



Auli Kuismin

Massastabiloinnin laatuun ja toteutettavuuteen vaikuttavia tekijöitä

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 19.11.2017

Valvoja: Professori Leena Korkiala-Tanttu

Ohjaaja: DI Juha Forsman

Tekijä Auli Kuismin

Työn nimi Massastabiloinnin laatuun ja toteutettavuuteen vaikuttavia tekijöitä

Koulutusohjelma Ympäristö- ja yhdyskuntatekniikka

Pää-/sivuaine Georakentaminen

Koodi R3003

Työn valvoja Leena Korkiala-Tanttu

Työn ohjaaja(t) Juha Forsman

Päivämäärä 19.11.2017

Sivumäärä 63 + 10

Kieli suomi

Tiivistelmä

Tässä työssä on kartoitettu keskeisiä massastabiloinnin laatuun ja toteutettavuuteen vaikuttavia tekijöitä sekä kirjallisuuden että eri esimerkkikohteista saatujen kokemusten avulla. Tavoitteena oli myös kerätä yhteen esimerkkikohteista saatua hiljaista tietoa.

Massastabilointi on pehmeiden maa-ainesten lujittamismenetelmä, jossa savi, lieju, turve tai ruoppausmassa käsitellään sekoittamalla siihen sideainetta. Sideaineen vaikutuksesta maa-aines lujittuu homogeeniseksi kerrokseksi. Massastabiloinnin avulla voidaan parantaa maan ominaisuuksia sekä ehkäistä maassa rakentamisen tai käytön aikana tapahtuvia painumia ja muodonmuutoksia. Sideaineena voidaan käyttää sementtiä, kalkkia, teollisuuden sivutuotteita ja jäteaineita, sekä näiden sekoituksia. Stabiloinnin vaikutus maan ominaisuuksiin koostuu neljästä tekijästä: sideaineen ominaisuudet, stabiloitavan maan ominaisuudet, stabilointityön aikana vallitsevat olosuhteet, sekä lujittumisaikana vallitsevat olosuhteet. Erilaisia laatuun ja toteutettavuuteen vaikuttavia tekijöitä on esitelty kirjallisuusviitteiden sekä Suomessa, Ruotsissa ja Virossa sijaitsevien esimerkkikohteiden avulla.

Valmiin stabiloinnin lujuuden kannalta keskeisimpiä tekijöitä ovat oikea sideainereseptointi sekä riittävä sekoitusaika. Stabiloinnin lujuuteen voivat vaikuttavat heikentävästi laboratoriotutkimuksissa todetuista poikkeavat runkoaineen ominaisuudet, kuten rakeisuus, vesipitoisuus tai pilaantuneisuus, sekoitustyön epätasalaatuisuus, tai työmaalla vallitsevat, epäsuotuisat olosuhteet, kuten pakkanen, kuivuus tai tulva. Massastabiloinnin toteutettavuuteen vaikuttavat työmaalla olevat esteet, kuten olemassa olevat rakenteet, vanhat hirsiarinat sekä stabiloitavan maa-aineksen seassa olevat suuret kivet tai kannot. Ennakkotutkimuksilla ja oikeilla työmaajärjestelyillä moniin mahdollisiin ongelmiin voidaan varautua etukäteen.

Massastabiloinnin työnaikainen laadunvarmistus etenkin sideaineen sekoitustyön ja stabiloitavan kerroksen homogeenisuuden osalta on nykyisillä menetelmillä vaikeaa. Yksi ratkaisu ongelmaan voisi olla koneohjaus ja stabilointikärjen instrumentoinnin kehittäminen.

Avainsanat massastabilointi, laatu, stabiloitavuus, sideaineet

Author Auli Kuismin		
Title of thesis Factors affecting the quality and execution of mass stabilization		
Degree programme Transportation and Environmental Engineering		
Major/minor Geoengineering		Code R3003
Thesis supervisor Leena Korkiala-Tanttu		
Thesis advisor(s) Juha Forsman		
Date 19.11.2017	Number of pages 63 + 10	Language Finnish

Abstract

This thesis concentrates on presenting central factors affecting the quality and execution of mass stabilization as presented in literature as well as through experiences gained from different case examples. The goal of the thesis was also to gather together silent information from these cases.

Mass stabilization is a ground improvement method used to strengthen clay, mud, peat or dredged sediments by mixing in different binding agents. The binder stabilizes the soil into a homogenous layer. Mass stabilization can be used to improve the properties of the soil and to prevent settlement and deformations during and after construction. Binders include cement, lime, by-products and waste materials from industry, and different mixtures of these binders. The effect of stabilization on the qualities of soil is made up of four factors: qualities of the binders, qualities of the material to be stabilized, conditions during stabilization work and conditions during the curing time. Different factors affecting the quality and execution are presented through reference literature as well as case examples in Finland, Sweden and Estonia.

The most central factors affecting the strength of the finished stabilization are the right binder recipe and adequate mixing time. Unexpected qualities of soil, such as grain size distribution, water content or contamination, that differ from those observed in laboratory tests, uneven mixing or unfavorable conditions on site, such as freezing temperatures, drought or floods, can have an adverse effect on the strength of the finished stabilization. Factors affecting the execution of mass stabilization include obstacles on site, such as existing structures, old timber grillage and big rocks and tree stumps mixed in with the soil. Most potential problems can be prepared for in advance with proper preliminary investigations and site logistics.

Quality assurance during stabilization work especially in regards to mixing work and the homogeneity of the stabilized layer using current methods is difficult. Potential solutions could include the increased use of machine control in mass stabilization work and development of mixing blade instrumentation.

Keywords mass stabilization, quality, binders

Alkusanat

Haluan kiittää työni valvojaa professori Leena Korkiala-Tanttua sekä ohjaajaani Juha Forsmania erittäin asiantuntevasta opastuksesta ja nopeasta kommentoinnista.

Kiitos koko työyhteisölleni Ramboll Finland Oy:ssä vuosia jatkuneesta tuesta ja kannustuksesta.

Haluaisin kiittää vanhempiani kaikesta siitä henkisestä ja materiaalisesta tuesta, josta olen saanut nauttia koko elämäni ajan. Erityiskiitos työtilan, lastenhoidon ja ruokahuollon järjestämisestä, jotka olivat välttämättömiä tämän työn loppuun saattamiseksi. Kiitos myös siskolleni, jonka esimerkkiä seuraten olen huomannut, että 45 minuuttia on pitkä aika, jossa ehtii tehdä paljon.

Lopuksi haluaisin kiittää puolisoani Mattia ja poikaamme Einoa kaikesta tuesta ja rakkaudesta.

Helsinki 19.11.2017

Auli Kuismin

Auli Kuismin

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	
Abstract	
Alkusanat	
Sisällysluettelo	5
Merkinnät ja lyhenteet	7
1 Johdanto	8
2 Massastabilointi	9
2.1 Massastabilointi menetelmänä	9
2.2 Massastabilointilaitteisto	10
2.3 Massastabiloinnin käyttökohteet	11
2.4 Massastabiloidun maan ominaisuudet	13
3 Massastabiloinnin materiaalit	16
3.1 Runkoaine	16
3.2 Sideaineet	16
3.2.1 Yleistä	16
3.2.2 Sementti	17
3.2.3 Kalkki	18
3.2.4 Muut side- ja täyteaineet	18
4 Massastabiloinnin tutkimusmenetelmät	20
4.1 Laboratoriokokeet	20
4.1.1 Luokituskokeet	20
4.1.2 Stabiloitavuuskokeet	20
4.2 Koestabilointi	28
5 Massastabiloinnin laboratoriotutkimusten erityispiirteitä	29
5.1 Turpeen koostumuksen vaihtelu	29
5.2 Näytteiden esikuormitus	31
5.3 Vesimäärän lisäyksen vaikutus	32
5.4 Näytteiden säilytyksen vaikutus	33
5.5 Lujuus laboratoriossa vs. in situ	34
6 Massastabiloinnin suunnittelun vaikutus stabiloinnin laatuun ja toteutettavuuteen ...	35
6.1 Yleistä	35
6.2 Lähtötiedot	35
6.3 Stabiloinnin mitoitus	36
6.3.1 Mitoituksen periaatteet	36
6.3.2 Stabiloinnin liittyminen kovaan pohjaan	38
6.3.3 Heikot kohdat stabiloinnissa	38
6.4 Esteet stabilointialueella	39
6.5 Työmaajärjestelyt	41
7 Massastabiloinnin toteutusvaiheessa huomioon otettavia tekijöitä	42
7.1 Suunnitelman noudattaminen	42
7.2 Aikataulu	42
7.3 Sekoitustyö	43
7.4 Tiivistyspenger	44
7.5 Pölyäminen	46
7.6 Olosuhteet kohteessa	47
8 Massastabiloinnin laadunvalvonta	50

8.1	Yleistä.....	50
8.2	Laadunvalvonta tutkimukset in situ	51
8.3	Laboratoriokokeet stabiloidulle rakenteelle	54
8.4	Valvontakairausten haasteita	56
9	Johtopäätökset	58
	Lähdeluettelo.....	59
	Liiteluettelo	63
	Liitteet	

Merkinnät ja lyhenteet

A	[m ²]	ala
E ₅₀	[kPa]	muodonmuutosmoduuli
F	[N]	voima
Hh	[%]	hehkutushäviö
N _c		kantavuuskerroin
g	[m/s ²]	normaalikiikhtyvyys, 9,81 m/s ²
m	[kg]	massa
p	[kPa]	kairausvastus
q _u	[kPa]	puristuslujuus
s _p	[kN/m ² tai kPa]	puristuskokeella määritetty leikkauslujuus
s _u	[kN/m ² tai kPa]	maan likimääräinen leikkauslujuus
w	[%]	vesipitoisuus
ε	[%]	suhteellinen muodonmuutos
σ ₁ ,	[kN/m ²]	pystyjännitys
σ ₀	[kN/m ²]	tehokas pystyjännitys
τ	[kPa]	leikkausjännitys
LT		lentotuhka
PKT		palavan kiven tuhka
PlusCem/PlusSe		Plusementti
SRCem/SRSe		SR-sementti, sulfaatin kestävä sementtilaatu
UCS	[kPa]	unconfined compressive strength, puristuslujuus
YSe		yleissementti

1 Johdanto

Kaupungeissa parhaat rakennuspaikat, kalliopohjat ja kantavat maat ovat jo käytössä. Kaupunkirakenteen tiivistäminen kaupunkien keskustoissa johtaa pohjasuhteiltaan haastavien tonttien käyttöönottoon. Uutta rakennusmaata voidaan vallata merestä tai järvien rannoilta täyttämällä vesialueita. Kosteikkoja tai soistuneita alueita voidaan paaluttamalla, maamassoja vaihtamalla tai lisääaineilla parantamalla jalostaa paremmin rakennuskäyttöön soveltuviksi. Ympäristölainsäädäntö kuitenkin rajoittaa mahdollisuuksia maa-ainesten siirtelyyn. Massanvaihdoista aiheutuu myös huomattavia kuljetuskustannuksia, materiaalikustannuksia sekä ylijäämämassojen läjityksestä aiheutuvia kustannuksia. Hankalatkin materiaalit ja maa-ainekset on siten pyrittävä hyödyntämään joko rakennuskohteessa tai sen lähellä ja maa-aineksia mahdollisuuksien mukaan kierrättämällä.

Massastabilointi soveltuu menetelmänä hyvin erilaisten pehmeiden massojen, kuten saven, turpeen, liejun ja ruoppausmassojen kiinteytykseen. Massastabiloinnin avulla voidaan parantaa maan ominaisuuksia sekä ehkäistä maassa rakentamisen tai käytön aikana tapahtuvia painumia ja muodonmuutoksia. Massastabilointi parantaa maan lujuutta ja työstettävyyttä, ja sillä voidaan vaikuttaa maan vedenläpäisevyyteen.

Massastabiloinnin laatuun ja toteutettavuuteen vaikuttavat tekijät voidaan karkeasti jakaa suunnittelun aikana huomioitaviin tekijöihin ja työnaikaisiin tekijöihin. Monia massastabilointityön aikana stabiloinnin laatuun ja toteutukseen vaikuttavia asioita voidaan huomioida, ja tulee huomioida, jo suunnittelun aikana. Joihinkin yllättäviin seikkoihin on kuitenkin mahdotonta varautua etukäteen, eivätkä kaikki työnaikaiset asiat aina etene ennakkoodotusten mukaisesti. Työn aikana ilmenneistä yllätyksistä voidaan kuitenkin aina oppia, ja tiedon karttuessa mahdollisiin yllätyksiin osataan ehkä tulevaisuudessa varautua paremmin etukäteen.

Massastabiloinnin laatuun ja toteutettavuuteen vaikuttavista tekijöistä sekä eri massastabilointikohteiden onnistumisesta on olemassa paljon hiljaista, julkaisematonta ja kokemusperäistä tietoa. Ongelmana on myös tiedon hajanaisuus. Tässä diplomityössä on esitelty keskeisiä massastabiloinnin laatuun sekä stabilointityön toteutettavuuteen vaikuttavia tekijöitä. Työn tarkoituksena on myös kerätä yhteen esimerkkikohteista saatua hiljaista tietoa. Osa kohteista on esitelty lyhyesti ja osa laajemmin liitteinä olevissa kohdekorteissa. Työ on toteutettu kirjallisuusselvityksenä.

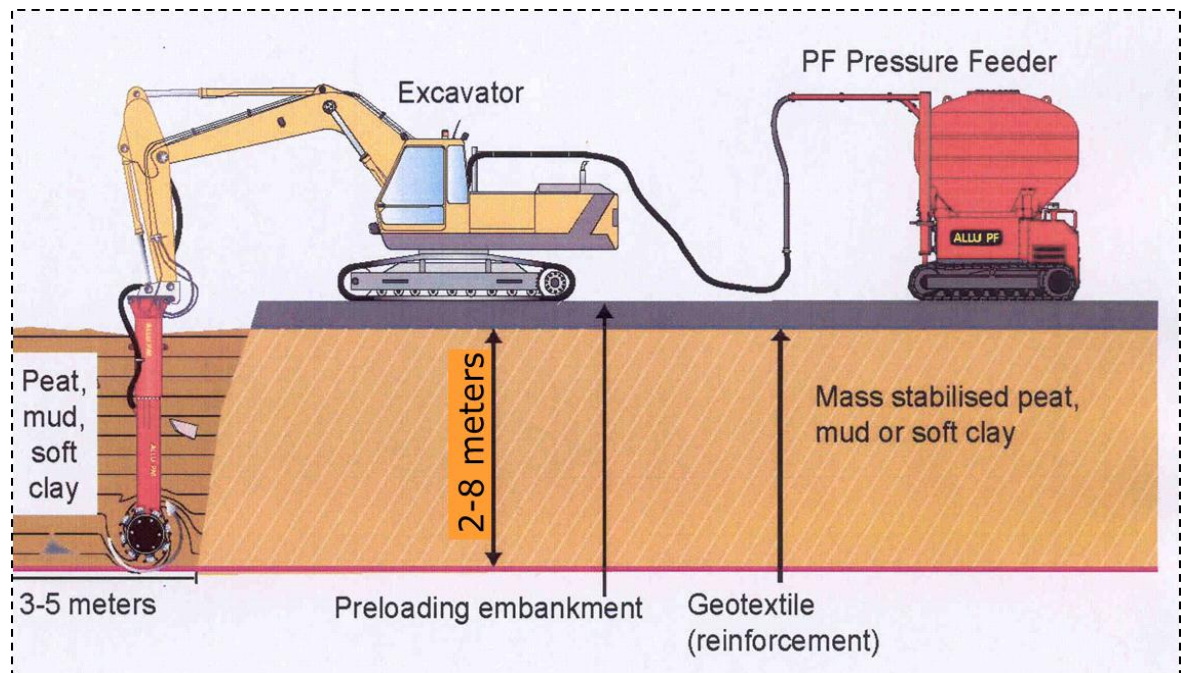
2 Massastabilointi

2.1 Massastabilointi menetelmänä

Massastabilointi on pehmeiden maa-ainesten lujittamismenetelmä, jossa savi, lieju tai turve lujitetaan sekoittamalla siihen sideainetta. Sideaineen vaikutuksesta maa-aines lujittuu homogeeniseksi kerrokseksi. Massastabiloinnilla pyritään kasvattamaan maakerrosten jäykkyyttä, jotta pohjamaan painumia pystytään rajoittamaan ja tasaamaan. Massastabilointi myös parantaa kokonaisstabiilitettä ja lisää pohjamaan kantavuutta, sekä helpottaa kaivua. Stabilointi mahdollistaa esimerkiksi luiskattujen kaivantojen tekemisen lujitettuun pehmeään pohjamaahan, ja parantaa heikkolaatuisten kaivumaiden laatua, jos stabilointi tehdään ennen kaivua. (Forsman et al. 2014; EuroSoilStab 2002).

Massastabilointia voidaan käyttää myös pilaantuneiden maiden käsittelyssä. Massastabilointi vähentää erityisesti maaperässä olevien raskasmetallien liukoisuutta veteen (Rekonen 1993). Stabiloitua savea on mahdollista käyttää myös tiivisterakenteissa, esim. pilaantuneen maan kapseloinnissa, sekä täyttömateriaalina ja tien pohjamateriaalina (Ravaska et al. 2003; Mäkelä et al. 2000).

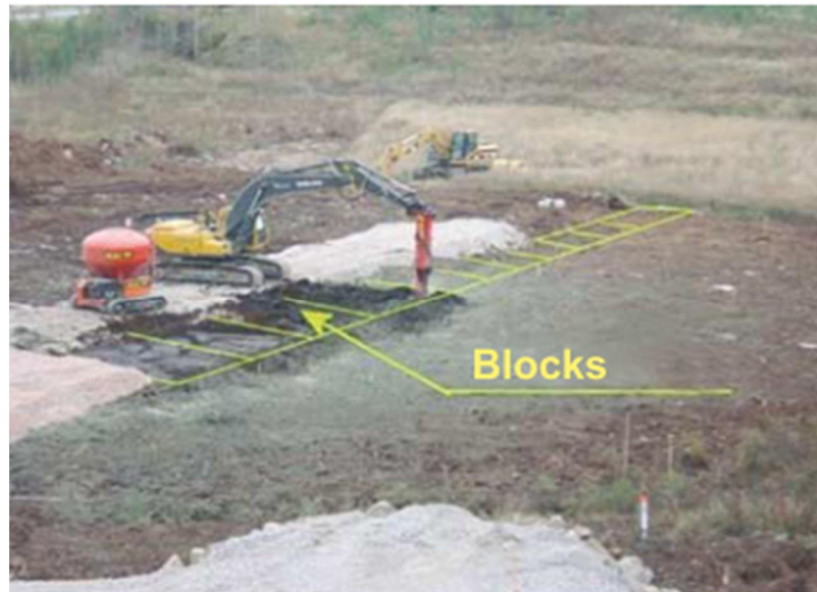
Massastabiloinnissa syötetään kuivaa sideainetta maaperään painesyöttimen avulla. Sideaine syötetään kaivinkoneen sekoittimen kärkeen, jossa pyörivä rumpusekoitin sekoittaa sideaineen maaperään ja samalla homogenisoi maa-ainesta. Sekoitustyö tehdään liikuttamalla sekoitinta pysty- ja vaakasuunnassa. Massastabiloinnin periaate on esitetty kuvassa 2.1. (Forsman et al. 2014).



Kuva 2.1. Massastabiloinnin periaate (Forsman et al. 2014).

Sekoitustyössä edetään tyypillisesti 3...5 m x 3...5 m ruuduissa, tai blokeissa. Stabilointityön jälkeen stabiloidun alueen päälle levitetään tiivistyspenger, jonka päältä päästään stabiloimaan seuraavaa ruutua. Usein valmiin stabiloinnin päälle levitetään myös esikuormituspenger, jonka alla lopullinen lujittuminen tapahtuu. Esikuormituspenger on välttämätön

erityisesti turvealueilla, jotta stabiloitu materiaali saadaan tiivistettyä stabiloinnin lujittumisaikana. Massastabiloinnin tavoiteltu saavutetaan yleensä 1..3 kuukauden aikana. Massastabilointia blokeissa tiivistyspenkereen päältä on esitetty kuvassa 2.2.



Kuva 2.2. Massastabilointia blokeissa (ALLU, 2007).

Massastabilointi voidaan tehdä koko pehmeän kerroksen paksuudelle, määräsyyvyyteen tai yhdistelmä rakenteena, jossa massastabiloinnin alla on stabilointipilarit. Massastabiloimalla koko pehmeä kerros saadaan aikaan lähes painumaton pohjanvahvistus penkereelle. (Forsman et al. 2014).

Suomessa massastabilointia kokeiltiin ensimmäistä kertaa Tielaitoksen kohteissa vuonna 1993 (Junnila & Tuhola, 1999). Veittostensuon pilottikohde vuonna 1993 oli Suomen, ja todennäköisesti maailman, ensimmäinen turpeen massastabilointikohde. Ruoppausmassojen stabilointia kokeiltiin ensimmäisenä Haminan satamassa vuonna 1996. (Lahtinen & Niutanen 2009).

2.2 Massastabilointilaitteisto

Massastabilointilaitteiston runkona on kaivinkone, johon liitetään erillinen sekoitinyksikkö ja painesyötin. Massastabilointijärjestelmä koostuu kaivinkoneesta, sekoitinyksiköstä, painesyöttimestä, ohjausyksiköstä ja tiedonkeruujärjestelmästä. (Forsman et al. 2014).

Nykyisillä laitteistoilla massastabiloinnin maksimisyvyys on hyvissä olosuhteissa 7...8 metriä. Saavutettavissa oleva stabilointisyvyys riippuu aina työskentelyolosuhteista ja käsiteltävän materiaalin laadusta. Optimaalinen stabiloitavan kerroksen paksuus on noin 3...5 m, mutta myös ohuempia kerroksia voidaan massastabiloida. (Forsman et al. 2014). Vaativissa olosuhteissa jo 5 m syvyisen massastabiloinnin alaosan sideainejakauma saattaa olla hyvin epätasalaatuinen (Liikennevirasto 2010).

Stabilointilaitteistossa voidaan käyttää erilaisia sekoituskärkiä, jotka valitaan stabiloitavan maa-aineksen mukaan. Sekoituskärjet ovat pyöriviä rumpuja, joissa on erilaisia hampaita ja teriä maan sekoittamista ja leikkaamista varten. Erilaisia sekoituskärkiä on esitetty kuvassa 2.3.

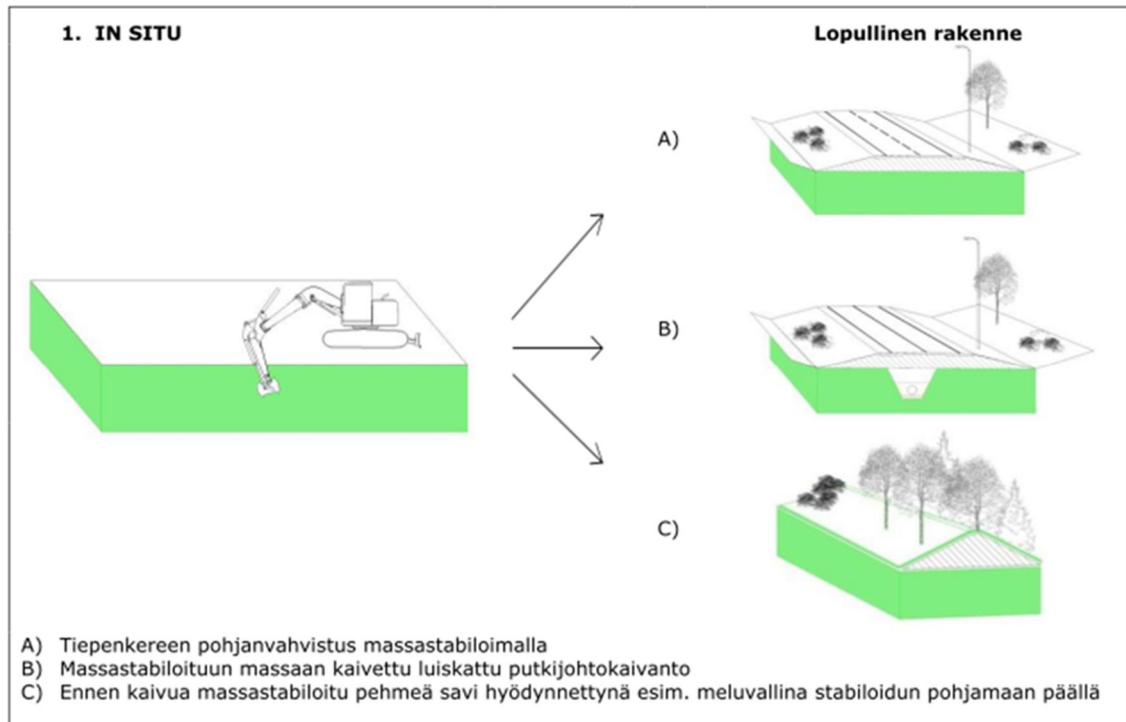


Kuva 2.3. Massastabiloinnissa käytettäviä sekoituskärkiä (Forsman et al. 2014).

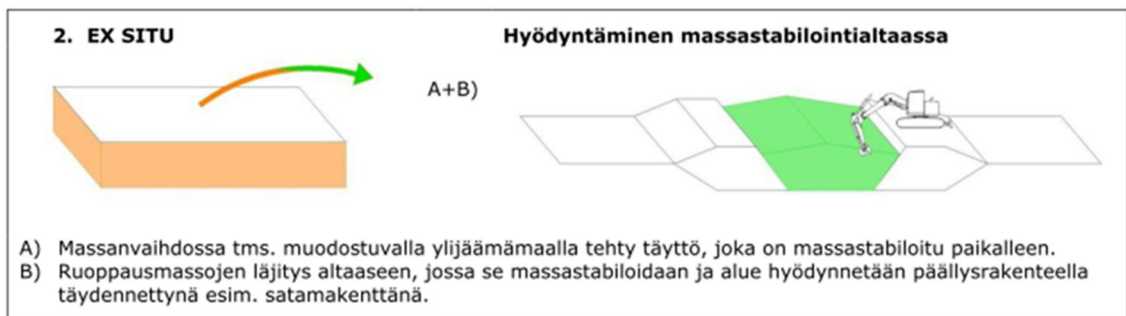
2.3 Massastabiloinnin käyttökohteet

Massastabilointia voidaan käyttää useissa eri käyttökohteissa sekä pohjanvahvistusmenetelmänä että heikkolaatuisen maa-aineksen jalostusmenetelmänä. Massastabiloinnin käyttökohteita ovat esimerkiksi tiet ja kadut, rautatiet, kunnallistekniikka ja verkostot, satamat ja meriväylät, maisema- ja viherrakentaminen, ulkoliikuntapaikat, ympäristönsuojausraken-
teet, kaivosalueet, kaatopaikat ja jälleenkäsittelyalueet, teollisuuden ja kaupan alueet, talonrakennuskohteet sekä tulvasuojelu. (Forsman et al. 2014).

Massastabilointi voidaan tehdä joko in situ, eli paikalla, tai ex situ, eli stabiloimalla kaivet-
tuja tai ruopattuja massoja (Forsman et al. 2014). Kuvassa 2.4 on esitetty in situ massasta-
bilointia kolmessa eri käyttötarkoituksessa: tiepenkereen pohjanvahvistuksena, mahdollis-
tamaan luiskatun putkikaivannon kaivaminen ja mahdollistamaan pehmeän saven käyttö
meluvallin rakentamiseen. Kuvassa 2.5 on esitetty ex situ massastabilointia ja stabiloidun
massan hyödyntämistä massastabilointialtaassa. Massastabilointi ja allas jäävät osaksi lo-
pullista rakennetta.



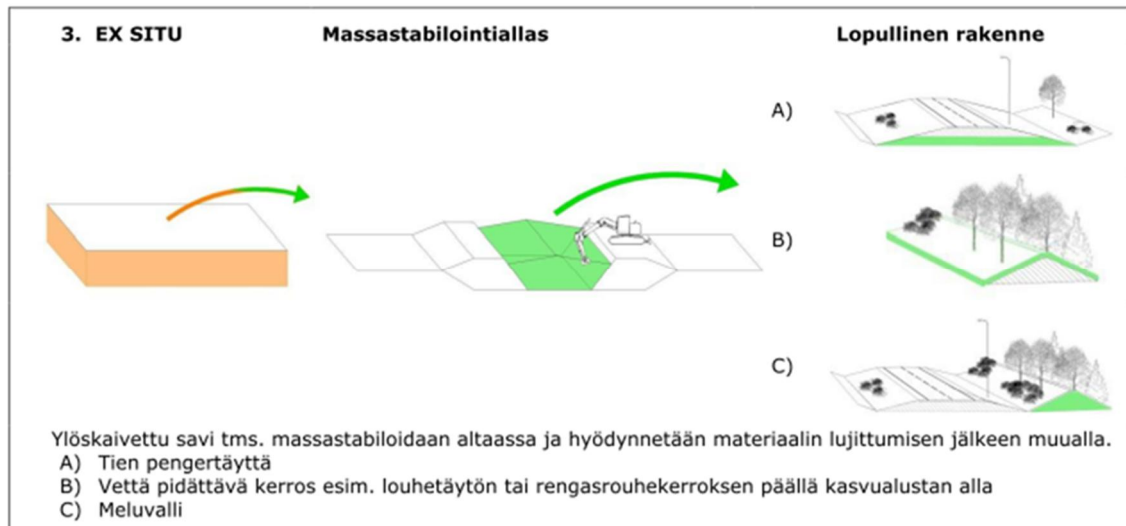
Kuva 2.4. In situ massastabiloinnin erilaisia käyttökohteita (Forsman et al. 2014).



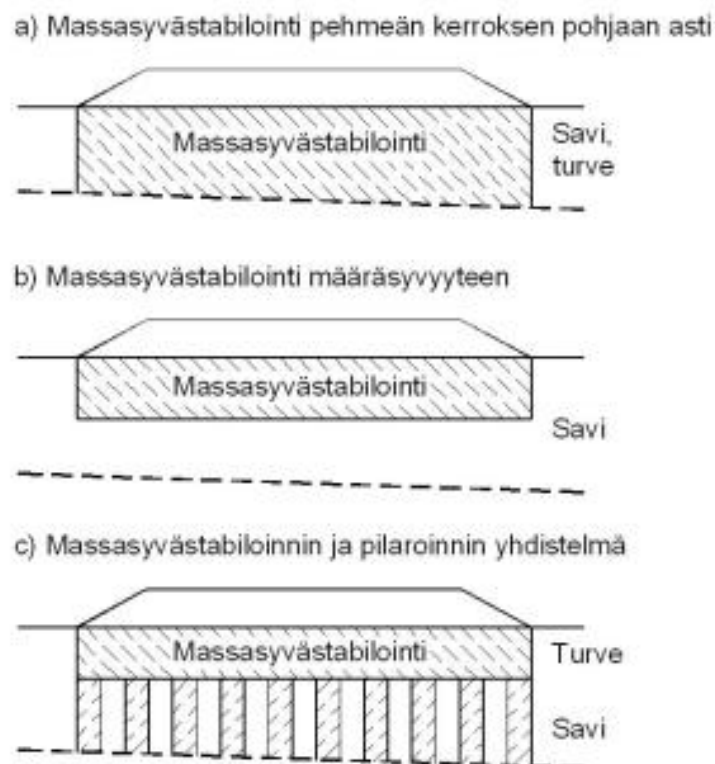
Kuva 2.5. Ex situ massastabilointia ja stabiloidun massan hyödyntämistä massastabilointialtaassa (Forsman et al. 2014).

Massastabilointia voidaan käyttää myös esimerkiksi heikkolaatuisen ylijäämämaan lujittamiseen, jolloin turve, lieju tai savi voidaan hyödyntää hankkeessa täyttömateriaalina pengertöissä, meluvalleissa, luiskissa ja maisemointirakenteissa. Tällöin stabiloinnille asetetut lujuusvaatimukset ovat yleensä alhaisemmat, sillä stabiloinnilla pyritään vain saamaan pehmeä maamassa käsiteltävään ja tiivistettävään tilaan. (Liikennevirasto 2010).

Kuvassa 2.6 on esitetty ex situ massastabilointia massastabilointialtaassa, josta stabiloitu ja lujittunut savi voidaan siirtää käyttökohteeseen. Mahdollisia käyttökohteita ovat mm. tiet ja maisemointirakenteet. Ex situ stabilointia voidaan käyttää myös ruoppausmassojen stabilointiin suoraan proomussa, josta stabiloitu massa siirretään käytettäväksi lopullisessa rakenteessa (Forsman et al. 2014). Massastabilointi voidaan ulottaa kovaan pohjaan asti, määräsivyydelle, tai se voidaan yhdistää pilaristabilointiin. Edellä mainitut vaihtoehdot on esitetty kuvassa 2.7.



Kuva 2.6. *Ex situ* massastabilointi altaassa, josta stabiloitu massa siirretään käytettäväksi lopullisessa rakenteessa (Forsman et al. 2014).



Kuva 2.7. Massastabilointi voidaan suunnitella pehmeän kerroksen pohjaan asti, määräsyvyyteen tai yhdistää pilaristabilointiin (Liikennevirasto 2010).

2.4 Massastabiloidun maan ominaisuudet

Massastabiloinnin vaikutus maan geoteknisiin ominaisuuksiin on merkittävä. Vaikutusten suuruus ja nopeus riippuvat stabiloinnissa käytetystä sideaineesta ja sen määrästä, runkoaineesta, lujittumisajasta, lämpötilasta ja tiivistyksestä. Massastabilointi muuttaa maan vesi-

pitoisuutta, plastisuutta, tilavuuspainoa, lujuus- ja kokoonpuristuvuusominaisuuksia sekä vedenläpäisevyyttä. (Forsman et al. 2014).

Stabiloinnin vaikutus maan ominaisuuksiin koostuu neljästä tekijästä: sideaineen ominaisuudet, stabiloitavan maan ominaisuudet, stabilointityön aikana vallitsevat olosuhteet, sekä lujittumisaikana vallitsevat olosuhteet (Kitazume & Terashi 2013). Tekijät on esitetty taulukossa 2.1.

Taulukko 2.1. Stabiloidun maan ominaisuuksiin vaikuttavia tekijöitä (Kitazume & Terashi 2013, muokattu).

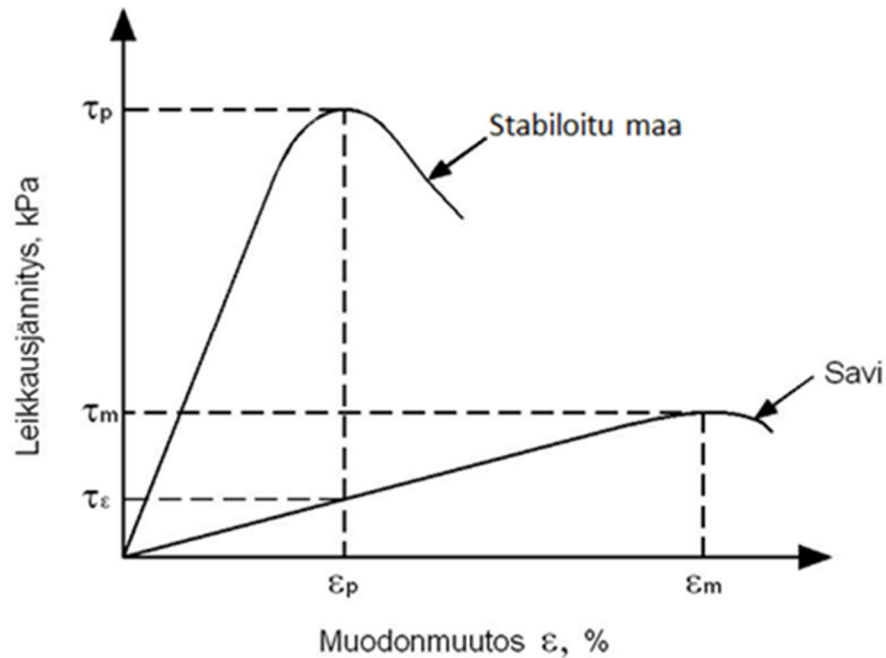
Sideaineen ominaisuudet	<ul style="list-style-type: none"> - Sideainetyyppi - Sideaineen määrä ja laatu - Sideaineen ja maan seokseen lisättävät muut materiaalit
Stabiloitavan maan ominaisuudet	<ul style="list-style-type: none"> - Vesipitoisuus - Maan fysikaalinen, kemiallinen ja mineraloginen koostumus - Orgaanisen aineksen määrä ja laatu - Huokosveden happamuus (pH)
Olosuhteet stabiloinnin aikana	<ul style="list-style-type: none"> - Laboratorio-olosuhteet / maasto-olosuhteet - Stabilointityön homogeenisuus
Olosuhteet lujittumisen aikana	<ul style="list-style-type: none"> - Lämpötila - Lujittumisaika - Jäätyminen ja sulaminen - Tiivistäminen ja esikuormitus

Stabilointi nostaa maan tilavuuspainoa ja pienentää vesipitoisuutta. Tilavuuspaino kasvaa lisätyn sideaineen johdosta. Åhnberg (2006) havaitsi tutkimuksessaan, että turpeen stabilointi sideainemäärällä 300 kg/m^3 kasvattaa maan tilavuuspainoa jopa 20 %. Tiivistyspenkereen käyttö stabiloinnin jälkeen kasvattaa tilavuuspainoa entisestään. Saven tilavuuspaino kasvaa stabiloinnin johdosta vain hieman. (Åhnberg 2006).

Maan vesipitoisuuden lasku stabiloinnissa johtuu kuivan sideaineen lisäyksestä, sekä siitä, että sideainereaktiot kuluttavat vettä. Jonkin verran vettä myös haihtuu stabilointityön aikana. Suurin vesipitoisuuden aleneminen tapahtuu ensimmäisen viikon aikana, mutta lasku jatkuu vähintään kuukauden stabilointityön jälkeen. Vesipitoisuuden lasku, ja sen mukana plastisuuden lasku, tuo mukanaan lujuuden kasvun. (Åhnberg 2006).

Tutkimuksissa on havaittu, että maan vedenläpäisevyys voi stabiloinnin seurauksena sideaineesta riippuen joko kasvaa tai laskea. Sideaineen vaikutusten, stabiloinnista kuluneen ajan, kuormitusolosuhteiden ja maan makrorakenteen vuoksi stabiloidun maan vedenläpäisevyys voi olla joko suurempi tai pienempi kuin stabiloimattoman maa-aineksen. (Åhnberg 2006). Åhnberg (2006) esittää, että vedenläpäisevyyden kasvu välittömästi stabiloinnin jälkeen johtuu maan kokkaroitumisesta sideaineiden sisältämän kalsiumhydroksidin osallistuessa ioninvaihtoon maaperässä. Tämä reaktio on erityisen voimakas kalkilla. Perinteisesti käytetyillä sideaineilla, kuten kalkilla ja sementillä stabiloitaessa vedenläpäisevyys yleisesti pienenee pitkällä aikavälillä sideainereaktioiden reaktiotuotteiden määrän lisääntyessä ja lujuuden kasvaessa.

Stabilointi pienentää maan kokoonpuristuvuutta ja kasvattaa lujuutta. Stabiloidun saven lujuuden kasvu on suoraan verrannollista lisättyyn sideainemäärään ja kuluneeseen reaktioaikaan. Lujuuden kasvu ei kuitenkaan ole lineaarista. Esimerkiksi perussementillä stabiloidun saven lujuuden kasvu on voimakkainta ensimmäisenä päivänä stabiloinnin jälkeen. (Åhnberg et al. 1995). Kuvassa 2.8 on esitetty stabiloinnin vaikutus saven leikkausjännitykseen ja muodonmuutokseen.



Kuva 2.8. Stabiloinnin vaikutus saven leikkausjännitykseen ja muodonmuutokseen (Forsman et al. 2014).

3 Massastabiloinnin materiaalit

3.1 Runkoaine

Massastabiloinnin runkoainetta ovat yleensä savet ja turpeet, sekä ruoppausmassat, kuten liejut ja sedimentit. Massastabiloinnissa sekoitetaan usein erityyppisiä päällekkäisiä maakerroksia keskenään. Turvetta voidaan sekoittaa alapuoliseen savi-, siltti- tai hiekkakerrokseen, jolloin turpeen sekaan saadaan mineraalista maa-ainesta parantamaan stabiloituvuutta. Turpeen tai liejun stabiloituvuutta voidaan myös tehostaa sekoittamalla stabiloitavaan maakerrokseen sen pinnalle levitettyä hiekkaa tai kivituhkaa. (Liikennevirasto 2010).

Monet stabiloitavan maan, eli runkoaineen, ominaisuudet vaikuttavat maan stabiloituvuuteen sekä siihen, kuinka paljon maan geotekniset ominaisuudet muuttuvat stabiloinnin seurauksena. Esimerkiksi maan vesipitoisuudella, rakeisuudella, happamuudella, humuksen määrällä ja laadulla sekä maan mineraalikoostumuksella on todettu olevan vaikutusta maan stabiloituvuuteen. Etenkin sementtistabiloinnissa maan vesipitoisuudella on suuri vaikutus stabiloituvuuteen, sillä vesi-sementtisuhte vaikuttaa oleellisesti sideaineen lujittumiseen. Saavuttaakseen saman vesi-sementtisuhteen, paljon vettä sisältävä runkoaine tarvitsee enemmän sementtiä. Stabiloitavan maan pH-arvo puolestaan vaikuttaa stabiloituvuuteen etenkin kalkkistabiloinnissa, jonka potsolaanireaktiot vaativat riittävän korkean pH:n. Tutkimusten mukaan sideainemäärän tulee ylittää tietty kynnyсарvo, jotta lujittumisreaktiot käynnistyvät. Tämä viittaisi siihen, että emäksisen sideaineen tulee ensin neutraloida hapant maa, minkä jälkeen loppuosa sideaineesta pääsee lujittamaan sitä. Stabiloitavan maan pH-arvo indikoi tehokkaasti sideainereaktion onnistumista. (Janz & Johansson 2002; Chew et al. 2004; Kitazume & Terashi 2013).

Orgaanisen aineksen sisältämät humushapot estävät potsolaanireaktioita heikentäen näin maan stabiloituvuutta. Humushapot laskevat maan pH-arvoa, jolloin potsolaanireaktiolle tarpeellinen korkea pH ei toteudu. Humushapot heikentävät turpeen ja liejun stabiloituvuutta etenkin kalkilla stabiloitaessa, minkä vuoksi paljon orgaanista ainetta sisältävän maan stabilointiin valitaankin yleensä jonkin toinen sideaine. Saven ja siltin humuspitoisuudet ovat yleensä liian pieniä vaikuttamaan stabiloituvuuteen sementtiä sideaineena käytettäessä. Orgaanista ainesta sisältävät turpeet ja liejut vaativat stabiloituakseen yleensä paljon sideainetta. Nämä maalajit sisältävät vähemmän kiinteitä partikkeleja kuin savi ja siltti, joten tarvitaan paljon sideainetta sitomaan toisiinsa verrattain kaukana toisistaan olevat partikkelit. Paljon orgaanista ainesta sisältävät maalajit ovat myös huokoisempia, ja niiden vesipitoisuus on suurempi kuin vähän orgaanista ainesta sisältävien maalajien. Stabiloituvuutta voidaan parantaa sekoittamalla turpeen tai liejun sekaan mineraaleja sisältävää ainesta lisäämään kiinteiden partikkelien määrää. (Janz & Johansson 2002).

Erilaisten savien on todettu stabiloituvan eri tavalla. Hainari (2016) tutki diplomityössään massastabiloinnin vaikutusta maan indeksi- ja geoteknisiin ominaisuuksiin todeten, että heikosti plastinen savi lujittui paremmin kuin erittäin plastinen savi.

3.2 Sideaineet

3.2.1 Yleistä

Massastabiloinnissa käytettävä sideaine sisältää yhtä tai useampaa stabiloivaa ainetta. Useampaa kuin yhtä stabiloivaa ainetta sisältäviä sideaineita kutsutaan seossideaineiksi (Li-

kennevirasto 2010). Käytetyimmät sideaineet ovat sementti ja kalkki sekä niiden seos. Myös erilaiset kuonat, lentotuhkat ja kipsimäiset materiaalit soveltuvat käytettäväksi massastabiloinnissa. Teollisuuden sivutuotteita hyödyntämällä on taloudellisesti mahdollista toteuttaa suurienkin massamäärien stabilointi. Sideainekustannukset muodostavat merkittävän osan massastabilointiprojektin kustannuksista. Sideaineen valintaan vaikuttavat mm. sideaineen aikaansaamat lujittumis-, jännitys-muodonmuutos-, liukoisuus- ja vedenläpäisevyysominaisuudet sekä alkulujittuminen ja lujittumisnopeus. (Forsman et al. 2014).

3.2.2 Sementti

Sementti on yleisimmin käytetty sideaine massastabiloinnissa. Sementtejä käytettäessä on saavutettavissa useimmiten muita sideainetyyppejä parempi alkulujittuminen, mistä on usein hyötyä stabilointityön toteuttamisessa. Stabiloinnin pitkäaikaislujittumisen osuus sementtejä käytettäessä on yleensä muita sideainevaihtoehtoja pienempi. Sementti on hydraulinen sideaine, joka reagoidessaan veden kanssa muodostaa lujittuvaa massaa. Kun sementti sekoitetaan maa-ainekseen, alkavat ensimmäisenä reaktiot sementin ja maan sisältämän veden välillä. Reaktiossa muodostuu kalsiumhydroksidia, mikä kasvattaa seoksen pH:n lähelle kolmeatoista. Sekoitettavan massan vesi-sementtisuhde (kg/kg) on yksi tärkeimmistä parametreista, kun sideaineena käytetään sementtiä. Sementin hydrataatioreaktiossa muodostuva kalsiumsilikaattihydraattigeeli täyttää partikkelien välisiä huokosia reaktion edetessä, ja lujittuu vähitellen. Jos vesi-sementtisuhde on suuri, eli vettä on sementtiin nähden paljon, ovat sementtipartikkelien väliset etäisyydet suuria. Näin muodostuva massa on huokoisempaa ja lujuudeltaan heikompaa kuin pienellä vesi-sementtisuhteella valmistettu massa. (Forsman et al. 2014; Åhnberg et al. 1995; Janz & Johansson 2002).

Veden ja sementin hydrataatioreaktion jälkeen stabiloidun maan lujittuminen jatkuu hitaamman potsolaanireaktion vaikutuksesta. Hydrataatioreaktiossa syntynyt lämpö edistää potsolaanireaktiota. Tässä reaktiossa kalsiumhydroksidi reagoi maan aluminaattien ja silikaattien kanssa. Sementillä stabiloitaessa maan vedenläpäisevyys saattaa aluksi kasvaa, sillä sementin ja maaperässä olevan veden reaktiossa muodostuva kalsiumhydroksidi osallistuu ioninvaihtoon, mikä aiheuttaa maan kokkaroitumista. Kokkaroituminen on kuitenkin melko vähäistä. Vedenläpäisevyys pienenee nopeasti lujittumisen edetessä. (Janz & Johansson 2002; Åhnberg 2006).

Orgaanista ainesta sisältävän maan humushapot vaikeuttavat sementin potsolaanireaktiota, mikä hidastaa lujittumista. Humushapot reagoivat kalsiumhydroksidin kanssa muodostaen liukenemattomia yhdisteitä, jotka saostuvat partikkelien pinnalle. Ne estävät potsolaanireaktion jatkumisen ja lujuuden kasvun. Humushappojen vaikutuksesta myös potsolaanireaktiolle välttämätön korkea pH laskee ja lujuuden kehitys hidastuu. (Janz & Johansson 2002).

Sementtiä sideaineena käytettäessä sekoitustyön laatu näkyy lopputuloksessa voimakkaammin kuin kalkkipitoisia sideaineita käytettäessä. Tämä johtuu siitä, että sementeillä kalsiumionien liikkuminen runkoaineessa on vähäistä, eivätkä stabiloidussa massassa mahdollisesti esiintyvät epähomogeenisuudet juurikaan korjaannu sekoitushetken jälkeen. (Forsman et al. 2014).

Massastabiloinnissa käytettyjä sementtituotteita ovat standardin EN 197-1 mukaisesti:

- Plussementti (CEM II/B-M (S-LL*) 42,5 N),
- Rapidsementti (CEM II/A-LL 42,5 R),
- Pikasegmentti (CEM I 52,5 R)
- SR-sementti (CEM I 42,5 N-SR3).

Sulfaattipitoisen maaperän stabilointiin soveltuu sulfaatinkestävä sementtilaatu SR-sementti (Forsman et al. 2014).

3.2.3 Kalkki

Massastabiloinnin sideaineena käytetään lähinnä kalsiumoksidia (CaO), eli poltettua kalkkia, ja joskus myös kalsiumhydroksidia (Ca(OH)_2), eli sammutettua kalkkia. Kalkkituotteita käytetään massastabiloinnissa käytännössä lähes aina muiden sideainekomponenttien kanssa sekoitettuna. Kalsiumoksidin ja veden reaktiossa vapautuu runsaasti lämpöä, ja maaperä kiinteytyy, koska lämpö haihduttaa vettä (Åhnberg et al. 1995). Reaktiossa vesi sitoutuu kalkkiin, mikä myös poistaa vettä maasta. Veden määrän väheneminen kasvattaa tilapäisesti maan lujuutta. Reaktiossa saavutettu lujuus häviää, kun maaperään tulee lisää vettä. Lujuuden häviäminen tapahtuu kuitenkin useimmiten niin hitaasti, että maa ehtii sillä välin stabiloitua muiden reaktioiden vaikutuksesta. Sammutettu, hydratoitunut kalkki lujittaa maaperää vain potsolaanireaktion kautta. Reaktio ei sido vettä tai tuota lämpöä. Kalkkia sideaineena käytettäessä stabiloinnin alkulujittumisvaihe on suhteellisen hidas. Rakenteessa tapahtuu kuitenkin paljon pitkäaikaisreaktioita, ja kalkin potsolaaniset reaktiot voivat jatkaa jopa vuosia stabilointityön jälkeen. Kalkki diffundoituu ympäröivään saveen, mikä tasoittaa stabiloinnin epähomogeenisuuksia ja siten parantaa lopputuloksen laatua. (Forsman et al. 2014; Janz & Johansson 2002).

Maa-aineksen humuspitoisuudella on kalkkistabilointiin suurempi negatiivinen vaikutus kuin sementtistabilointiin, sillä kalkkia käytettäessä lujuus kehittyy pelkän potsolaanireaktion seurauksena. Humushapot laskevat maa-aineksen pH:ta, mikä vaimentaa potsolaanireaktiota. Orgaanista ainesta sisältävän maan stabiloinnissa sementti on kalkkia parempi sideainevaihtoehto. (Åhnberg et al. 1995; Janz & Johansson 2002).

3.2.4 Muut side- ja täyteaineet

Massastabiloinnissa voidaan sementin ja kalkin lisäksi hyödyntää myös teollisuuden sivutuotteita ja jättemateriaaleja, kuten erilaisia kuonia, lentotuhkia ja kipsimäisiä materiaaleja. Näitä materiaaleja käytetään tyypillisesti kaupallisten sideaineiden rinnalla vaikuttamaan positiivisesti saavutettaviin ominaisuuksiin sekä sideainekustannuksiin. Joissain erikoistapauksissa on mahdollista käyttää stabiloinnin sideaineena pelkästään teollisuuden sivutuotteita tai jättemateriaaleja. Sivutuotteita tai jättemateriaaleja käytettäessä kokonaissideainemäärä yleensä kasvaa jonkin verran. Lisääntynyt sideainemäärä saattaa jonkin verran hidastaa itse stabilointityön toteutusta. (Forsman et al. 2014).

Masuunikuona on raakaraudan valmistuksen sivutuote. Masuunihiekkaa saadaan granuloidulla kuona paineellisella vesisuihkulla. Hiekka on teräväsärmäistä, mistä johtuen se tiivistyy hyvin. Stabiloinnissa käytetään jauhettua masuunihiekkaa. (Mäkelä & Höynälä 2000). Masuunihiekalla on piilevät hydrauliset ominaisuudet, ja se aktivoidaan stabilointiin soveltuvaksi joko kalkilla tai sementillä. Kalkin ja sementin sideainereaktiot myös nostavat maan lämpötilaa, mikä vauhdittaa masuunikuonan reaktioita (Janz & Johansson 2002). Tutkimuksissa (Åhnberg 2006) on havaittu, että kuona-sementtiseoksen aikaansaama pitkäaikaislujuus on yleensä suurempi kuin pelkällä sementillä saavutettu lujuus.

Kivihiilen poltossa syntyy karkeaa pohjatuhkaa ja kevyempää lentotuhkaa. Lentotuhka erotetaan polttolaitoksen suotimilla muusta kaasuvirrasta. Tuhkan koostumus riippuu vahvasti poltettavan materiaalin koostumuksesta, palamisolosuhteista ja savukaasujen puhdistustekniikasta. Tuhkaa syntyy noin 10...15 % poltettavan kivihiilen painosta. (Mäkelä et al. 1998). Lentotuhkan potsolaaniset ominaisuudet vaihtelevat eri polttolaitosten välillä. Korkeaa polttolämpötilaa ja nopeaa jäähdytystä käyttämällä saadaan tuhkalta hyvät stabiilintominaisuudet. Lentotuhka on potsolaaninen materiaali, joka vaatii lujittuakseen kalkin tai sementin lisäyksen. Sideaineen hydraulisuus, eli sen reaktiivisuus veden kanssa, riippuu sen kalkki-pioksidisuhdesta. Sideaine, jolla on korkea kalkki-pioksidisuhde, reagoi veden kanssa. Lentotuhkan piioksidipitoisuus on korkea, mutta kalkkipitoisuus matala. (Janz & Johansson 2002). Hainari (2016) havaitsi diplomityössään, että käytettäessä pelkkää lentotuhkaa, johtuu osa stabiloitavan maan ominaisuuksien muutoksesta jo savea karkeamman kiintoaineksen määrän kasvusta. Pienillä lujuustasoilla juuri stabiloitavan maan indeksiominaisuuksien muutos voi olla maan hyötykäytön kannalta lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksien muutosta tärkeämpää. Tutkittu erittäin pehmeä savi muuttui lentotuhkalla stabiloinnin jälkeen selvästi maanrakentamiseen sopivammaksi. Tutkitun saven stabiloituvuutta olisi edesauttanut pienen sementtimäärän käyttäminen lentotuhkan aktivaattorina.

Turvetuhkaa voidaan myös käyttää massastabiloinnissa. Lentotuhkan tavoin myös turvetuhkan koostumus vaihtelee suuresti voimalaitoksesta toiseen. Tuhkaa muodostuu 3...10 % poltettavan turpeen kuivapainosta. Turvetuhkien lujittuvuuksissa on eroja; joskus turvetuhkan lujittamiseksi tarvitaan sementti- tai kalkkiaktivaattoria. Turvetuhkan kalkki-pioksidisuhde on korkeampi kuin kivihiilen tuhalla. Myös erilaisten orgaanisten jätteidensä, kuten oliivijätteen, riisinkuorijätteen ja yhdyskuntajätteen, poltossa syntyviä tuhkia on kokeiltu stabiloinnin sideaineena. (Mäkelä & Höynälä 2000; Ruohonen 2006).

Kipsiä syntyy energiantuotannon ja lannoiteteollisuuden sivutuotteena. Kipsiä on Suomessa ja Ruotsissa käytetty humuspitoisen maaperän stabilointiin kalkin kanssa, sekä supersulfaattisementin valmistukseen. Kuonia, tuhkia ja kipsimäisiä sideainekomponentteja käytettäessä on otettava huomioon materiaalin saatavuus, laatu ja laadun vaihtelu, välivarastointitarpeet ja käsittely työmaalla, kahden tai useamman sideainekomponentin sekoittamisen ja syöttämisen vaatimat järjestelyt sekä sivutuotemateriaalien käyttöön liittyvät lupa- ja ilmoitusasiat. (Viljas 1996; Forsman et al. 2014).

4 Massastabiloinnin tutkimusmenetelmät

4.1 Laboratoriokokeet

4.1.1 Luokituskokeet

Stabiloitavan runkomateriaalin laadun ja laatuvarioituvuuden selvittämisessä, eli maalajin luokittelussa, käytetään erilaisia luokituskokeita. Laboratoriossa tyypillisesti määritettyjä ominaisuuksia ovat rakeisuus, vesipitoisuus, märkätiheys, hehkutushäviö, sekä jotkut maan kemiallisista ominaisuuksista. Joissain tapauksissa voi olla tarpeen tutkia myös kohteen maaperän pilaantuneisuus. (Forsman et al. 2014).

Rakeisuus

Rakeisuudella tarkoitetaan maanäytteessä olevien erisuuruisien rakeiden suhteellista painojakaumaa. Lämpötilaltaan 64...0,074 mm rakeiden jakauma määritellään seulomalla ja sitä pienempien areometrin avulla. Kuivaseulontaa täydennetään tarvittaessa pesuseulonnalla, jos tutkittava maanäyte sisältää karkeiden lajikkeiden lisäksi myös hienoainesta. Areometrikokeella voidaan määrittää 0,074 mm pienempien rakeiden rakeisuuskoko, joskaan menetelmä ei sovellu lämpötilaltaan 0,001 mm pienempien rakeiden määrittämiseksi. Humuspitoisista näytteistä tulee poistaa humus ennen koetta. Savi- ja siltinäytteille riittää rakeisuuden määrittämiseksi yleensä pelkkä areometrikoe. (SGY 1985).

Vesipitoisuus

Vesipitoisuudella tarkoitetaan maa-aineksessa olevan veden ja kiinteän aineksen massojen suhdetta. Vesipitoisuus ilmoitetaan yleensä painoprosentteina kuivapainosta. Maa-ainekseen sitoutunutta kidevettä ei oteta huomioon veden massassa. (SGY 1985).

Hehkutushäviö

Hehkutushäviö määritetään, jotta saadaan selville maa-aineksen orgaanisen aineksen pitoisuus. Kitkamaalajeilla hehkutushäviö vastaa yleensä riittävällä tarkkuudella maa-aineksen humuspitoisuutta. Hienorakeisilla maalajeilla hehkutushäviöstä vähennetään haihtuneen kideveden osuus, joka voidaan arvioida näytteen sisältämän savilajitteen perusteella. Hehkutushäviö määritetään polttomenetelmällä. (SGY 1985).

Maan kemialliset ominaisuudet

Maan kemialliset ominaisuudet vaikuttavat sideaineiden lujittumisreaktioihin ja sitä kautta sideaineen valintaan. Maanäytteestä määritetään yleensä sulfiitti- ja kloridipitoisuudet, pH-arvo sekä joissain kohteissa maaperän pilaantuneisuuteen liittyvien kemikaalien pitoisuuksia. (EuroStabSoil 2002).

4.1.2 Stabiloitavuuskokeet

Sideaineen soveltuvuus kuhunkin suunnittelukohteeseen osoitetaan laboratoriossa tehtävillä stabiloitavuuskokeilla ja tarvittaessa kohteessa tehtävällä koestabiloinnilla. Ennen stabiloitavuuskokeiden tekemistä tulee tuntea kohteen maakerrosrajat, eri kerrosten luokitusominaisuudet, lujuus- ja painumaominaisuudet sekä pohja- ja orsiveden pintojen tasot. Stabilointikohteesta otetaan näytteitä, jotka edustavat kattavasti stabiloitavaa ainesta. Näytteenottopisteet valitaan kohteessa tehtyjen pohjatutkimusten perusteella. Näytteiden tulee edustaa kohteen tärkeimpiä tai olosuhteiltaan haastavimpia kohtia. (Liikennevirasto 2010; EuroStabSoil 2002; Forsman et al. 2014).

Massastabiloinnissa käytetään sellaista sideainetta, joka reagoi tunnetulla tavalla maakerrosten kanssa. Luokituskokeiden perusteella valitaan alustavat sideaineet ja niiden määrät, joita käytetään stabiloitavuuskokeiden tekemiseen laboratoriossa. Alustavien määritysten jälkeen reseptointia voidaan vielä muuttaa sen jälkeen, kun alkuperäisen sideainereseptoinnin toimivuutta on arvioitu. Stabiloitavuuskokeiden yhteydessä selvitetään sideaineen kelpoisuus, eli sen soveltuvuus käyttökohteeseen. Varsinaisessa stabiloitavuustutkimusohjelmassa kokeillaan yleensä useampia sideainereseptejä kuin alustavassa vaiheessa. Yhdessä kohteessa voidaan käyttää useita sideainereseptejä, mikäli kohteen stabiloitavuus ja pohjasuhteet ovat vaihtelevia. Useita sideainereseptejä käyttämällä voidaan optimoida kustannuksia ja saavutettavia teknisiä ominaisuuksia. (Liikennevirasto 2010; EuroSoilStab 2002). Eri sideaineiden soveltuvuutta eri pohjoismaisten maalajien stabiloinnissa on esitelty taulukossa 4.1.

Taulukko 4.1. Laboratoriokokeissa havaittu suhteellinen lujuuden kasvu (28 päivän ikäisille näytteille) pohjoismaisilla maalajeilla (EuroSoilStab 2002, muokattu).

Sideaine	Siltti Org. ainesta 0-2 %	Savi Org. ainesta 0-2 %	Orgaaniset maalajit, Org. ainesta 2-30 %	Turve Org. ainesta 50-100 %
Sementti	xx	x	x	xx
Sementti + kipsi	x	x	xx	xx
Sementti + masuunikuona	xx	xx	xx	xxx
Kalkki + sementti	xx	xx	x	-
Kalkki + kipsi	xx	xx	xx	-
Kalkki + kuona	x	x	x	-
Kalkki + kipsi + kuona	xx	xx	xx	-
Kalkki + kipsi + sementti	xx	xx	xx	-
Kalkki	-	xx	-	-
xxx	erittäin hyvä useissa tapauksissa			
xx	hyvä useissa tapauksissa			
x	hyvä joissain tapauksissa			
-	ei sovellu			

Stabiloitavuuskokeissa maanäytteeseen sekoitetaan laboratoriossa eri sideaineita tai niiden sekoituksia, ja stabiloidusta näytteestä tehdään koekappaleita. Ruuhonen (2006) ja Leivo (2009) ovat esitelleet diplomitöissään erilaisten pienillä sementtimäärillä stabiloitujen koekappaleiden valmistusta ja kappaleille tehtyjä kokeita. Koekappaleita valmistettiin kahden kokoisia, sekä standardikokoisia (halkaisija 50 mm, korkeus 100 mm) että pieniä (halkaisija 20 mm, korkeus 40 mm). Ruuhonen (2006) totesi tutkimuksessaan, että pienet koekappaleet eivät ole yleisten laboratorio-ohjeiden mukaisia, mutta kappaleiden pieni koko mahdollisti suuren näytemäärän ja nopean käsittelyn. Koekappaleet valmistetaan sullomalla stabiloitua maa-ainesta sylinterinmuotoiseen muottiin.

Stabiloitavuuskokeissa on tärkeää ottaa huomioon tutkittavan runkoaineen laatu, ja toteuttaa stabiloidun kappaleen lujittumisen testaaminen kyseiselle materiaalille sopivalla tavalla. Koekappaleet tulisi käsitellä ja tutkimuksen toteuttaa tyypillisimmin stabiloitavuustestauksessa käytetyn toimintatavan mukaisesti, eli sekoittamalla sideaine runkoaineeseen, tiivistämällä seos näytesyliinteriin sekä säilyttämällä näytesyliinterit vakioidussa lämpötilassa ja kuivumiselta suojattuna koko lujittumisvaiheen ajan. (Forsman et al. 2014). Koekappaleiden valmistusta ja käsittelyä on esitetty kuvassa 4.1.

Stabiloitavuuskokeiden tekemiseen ei tähän mennessä ole ollut yhteistä kansallista ohjetta, joten eri laboratorioissa rinnakkaisilla näytteillä stabiloitavuuskokeilla saatavan lujuudet ovat joissain tapauksissa vaihdelleet merkittävästi. Liikenneviraston uuden työn alla olevan Syvästabilointiohjeen luonnoksen liitteenä on stabiloitavuuskokeiden toteutusohje.



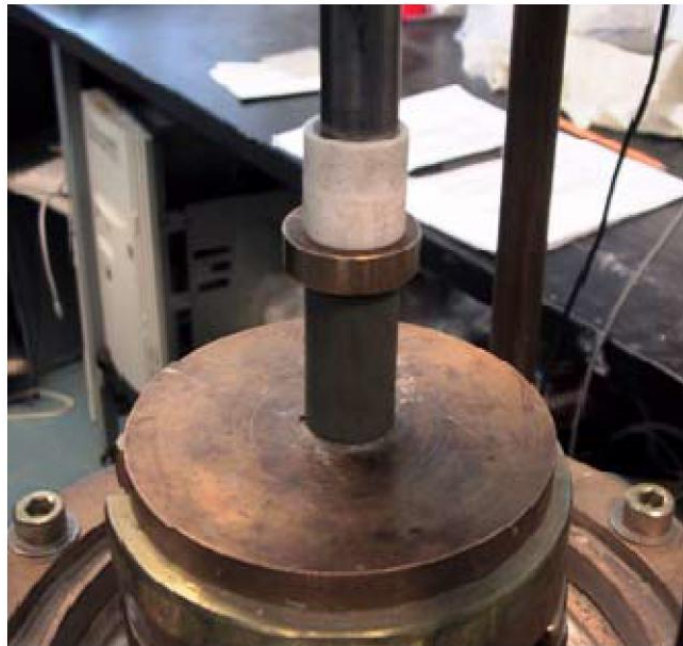
Kuva 4.1. Laboratoriossa valmistettujen, stabiloitujen näytekappaleiden valmistusvaiheet. Savi sekoitetaan hyvin ja sideaine sekoitetaan saveen käsin muovipussissa puristelemalla (ylärivi). Pienet näytekappaleet sullotaan lääkeruiskuihin ja massa tiivistetään pitämällä ruiskuja minuutin ajan 100 kPa paineen alla (2. rivi). Isot näytekappaleet tiivistetään lyömällä pleksiputkea alustaa vasten. Kustakin seoksesta määritetään kieritysraja ja jokaisesta erästä vesipitoisuus (3. rivi). Kaikki näytekappaleet säilytetään koestamiseen saakka veden alla huonelämpötilassa tai halutussa vakiolämpötilassa (alarivi). (Leivo 2009). Kuvassa esittely menettelytapa ei vastaa Liikenneviraston Syvästabilointiohjeen 2017 luonnoksen liitteenä olevaa stabiloitavuuskokeiden laboratorio-ohjetta.

Koekappaleiden lujuusominaisuuksien määrittämiseen käytetään tyypillisimmin yksiaksiaalista puristuskoetta, jonka avulla voidaan määrittää stabiloidun maan puristuslujuus, suun-

taa-antava leikkauslujuus sekä muodonmuutosominaisuudet (kimmomoduuli E_{50}). Tuloksia täydennetään tarvittaessa kolmiaksisiaalisilla puristuskokeilla ja ödometrikokeilla. Usein ympäristökohteissa tehdään koestabiloinnin yhteydessä myös vedenläpäisevyysmäärittäyksiä ja liukoisuustestejä. (Liikennevirasto 2010; Forsman et al. 2014).

Yksiaksisiaalinen puristuskoe

Puristuskokeella voidaan määrittää kappaleen puristuslujuus q_u . Yksiaksisiaalisessa puristuskokeessa koekappaletta puristetaan pystysuunnassa kappaleen murtumiseen asti. Yksiaksisiaalisessa puristuskokeessa kappaleeseen vaikuttaa ainoastaan pystysuuntainen pääjännitys σ_1 , eikä vaakasuuntaisia pääjännityksiä ole. (Rantamäki et al. 2004). Koekappaleen puristamista yksiaksisiaalisella puristuskolaitteella on esitetty kuvassa 4.2.

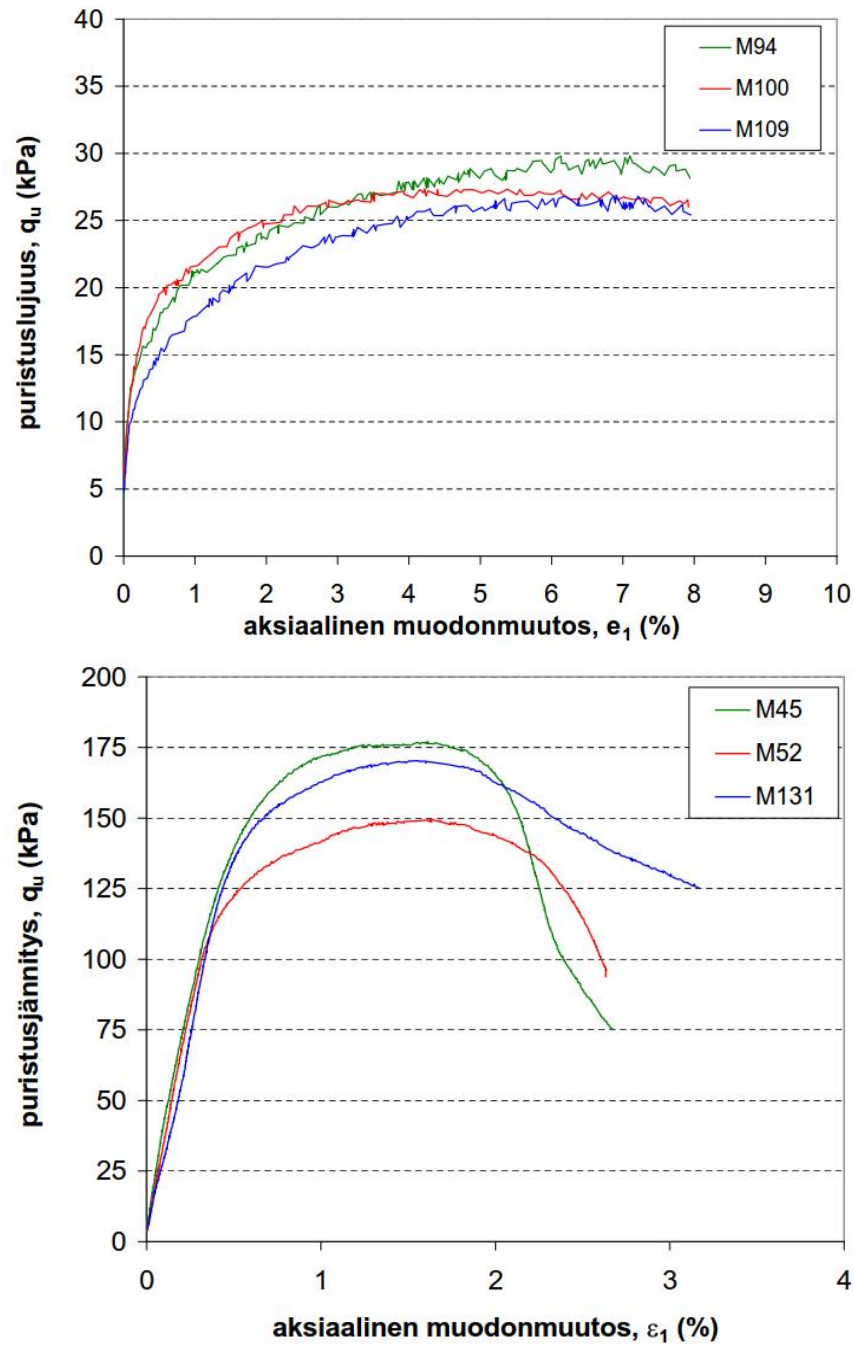


Kuva 4.2. Koekappale yksiaksisiaalisessa puristuskolaitteessa (Ruohonen 2006).

Puristuskokeesta piirretään kuvaaja, joka esittää mitatun puristusvoiman koekappaleen muodonmuutoksen suhteen. Murtohetkellä saavutetun suurimman puristusvoiman perusteella voidaan määrittää koekappaleen puristus- ja leikkauslujuus. Kovilla näytekappaleilla maksimivoima on helposti luettavissa kuvaajasta, mutta pehmeiden näytteiden maksimilujuus voi olla vaikea havaita tai sitä ei saavuteta ollenkaan. (Leivo 2009).

Tutkimuksessaan Leivo (2009) havaitsi, että stabiloidusta rakenteesta otetuista näytteistä tehtyjen koekappaleiden puristuskokeissa puristusvoima saattoi kasvaa vielä senkin jälkeen, kun kappaleeseen oli muodostunut selkeä murtopinta. Leivo epäili tämän johtuvan näytteen epähomogeenisesta rakenteesta.

Kuvassa 4.3 on esitetty esimerkkejä pehmeän ja kovan koekappaleen puristuskokekuvaajista. Kuvassa 4.4. on esitetty kova koekappale, jossa näkyy osittain lähes pystysuora murtopinta yksiaksisiaalisesta puristuskokeesta jälkeen. Kuvassa 4.5. on esitetty laboratorioissa, aumassa ja työmaalla stabiloidusta savesta tehtyjä koekappaleita, jotka on puristettu yksiaksisiaalisella puristuskokeella. Kappaleista on selkeästi nähtävissä murtopinnat.



Kuva 4.3. Esimerkki pehmeän (yllä) ja kovan (alla) koekappaleen puristuskoekuvaaajista (Leivo 2009).



Kuva 4.4. Kovan koekappaleen osittain lähes pystysuora murtopinta yksiakselisen puristuskokeen jälkeen (Leivo 2009).



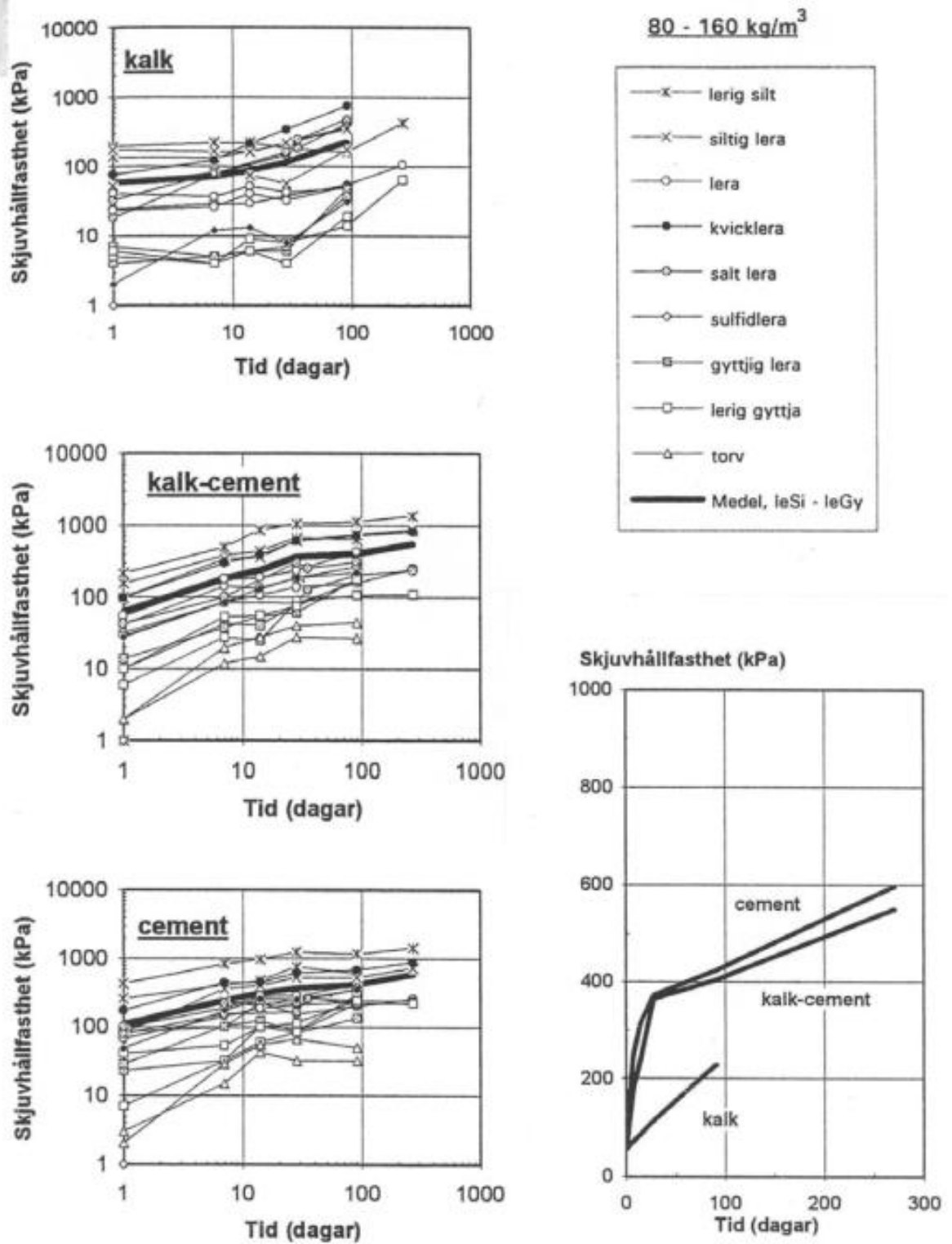
Kuva 4.5. Yksiakselisella puristuskolaitteella puristettuja koekappaleita (Leivo 2009).

Puristusjännitys lasketaan kaavan 4.1 mukaisesti. Mittaustuloksista voidaan laskea koekappaleen puristus- ja leikkauslujuudet yksinkertaisilla kaavoilla 4.1 ja 4.2. Puristuskokeella määritetystä leikkauslujuudesta käytetään symbolia s_p . (Rantamäki et al. 2004). Puristuslujuus ajan suhteen eri sideaineilla ja eri runkoaineilla on esitetty kuvassa 4.6.

$$q_u = \sigma_1 = \frac{F}{A} = \frac{m \cdot g}{A} \quad (4.1)$$

$$s_p = \frac{q_u}{2} \quad (4.2)$$

q_u on	maan puristuslujuus [kN/m ²]
F	koekappaletta puristava voima [N]
m	koekappaletta puristava massa [kg]
g	normaalikihtiävyys (9,81 m/s ²)
A	näytteen poikkileikkausala [m ²]
s_p	puristuskokeella määritetty leikkauslujuus [kN/m ²]



Kuva 4.6. Puristuslujuus ajan suhteen käytettäessä sideaineena kalkkia, kalkkisementtiä tai sementtiä 80-160 kg/m³. Sementtiä käytettäessä stabiloidun maan lujuus kasvaa voimakaimmin heti sekoittamisen jälkeen noin 25 päivän ajan. (Åhnberg et al. 1995).

Ödometrikoe

Ödometrikokeen avulla määritetään maalajien painumaominaisuuksia. Jäykkä ödometri-rengas estää koekappaleen sivuttaissuuntaisen muodonmuutoksen, jolloin kappaleeseen kohdistettu pystysuuntainen kuormitus aiheuttaa ainoastaan vertikaalista muodonmuutosta. Ödometrilaitte ja tavallinen selli on esitetty kuvassa 4.7.



Kuva 4.7. Ödometrilaitteisto (Korhonen 1967).

4.2 Koestabilointi

Koestabiloinnin päätarkoituksena on selvittää stabiloinnin käyttäytymistä ja ominaisuuksia in situ -olosuhteissa, ja valita näiden perusteella lopullinen sideainetyyppi ja -määrä sekä työtavat. Koerakenteen yhteydessä tarkastellaan stabiloidun massan lujittumista, lujittumisaikaa ja lujuuden kehitystä, massan työstettävyyttä, stabiloidun maan homogeenisuutta, stabiloinnin ympäristövaikutuksia sekä sideaineen ja stabilointityön kustannuksia. (EuroSoilStab 2002). Koestabiloinnissa saavutettava lujuus määritetään kairauksilla ja näytteiden tutkimuksilla. Kenttätutkimusmenetelmiä on esitelty luvussa 8.

5 Massastabiloinnin laboratoriotutkimusten erityispiirteitä

5.1 Turpeen koostumuksen vaihtelu

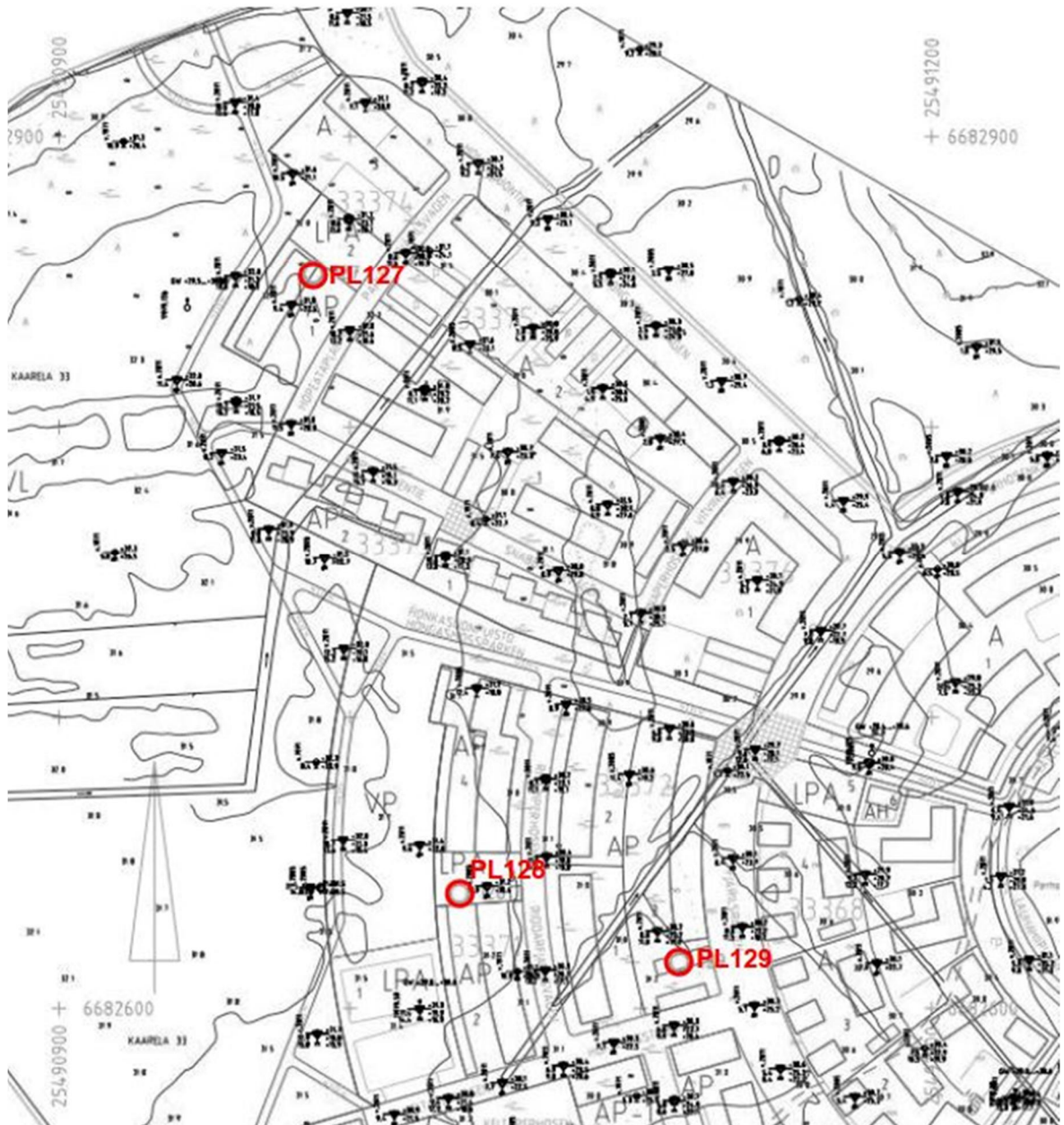
Turve on syvästabiloinnin kannalta usein haasteellinen materiaali, koska se on orgaanista aineista ja suon muodostumistavan takia sen koostumus voi vaihdella merkittävästi samalla suoalueella. Lisäksi ihmisen toiminta on saattanut muuttaa turpeen ominaisuuksia merkittävästi. Tällaisia ihmisen toimintoja voivat olla esimerkiksi suon kuivatus tai jätevesien johtaminen suoalueelle.

Esimerkkikohde Honkasuo

Honkasuolla otettiin stabiloitavuuskokeita varten turvenäytteitä kolmesta näytepisteestä. Tutkimuspisteiden PL127, PL128 ja PL129 sijainnit on esitetty kuvassa 5.1. Näytteille tehtiin indeksi- ja stabiloitavuuskokeet. Indeksikokeiden tuloksia on esitetty taulukossa 5.1 ja stabiloitavuuskokeiden tuloksia taulukossa 5.2. Pisteistä PL127 ja PL128 otettujen näytteiden tulokset vastasivat hyvin toisiaan, mutta pisteessä PL129 turpeen indeksiominaisuudet ja lujittuminen poikkesivat merkittävästi muista. Päällisin puolin näytteenottopisteet vastasivat toisiaan. Tässä vaiheessa ei ole tietoa siitä, onko pisteen PL129 turvekerros muita pisteitä kuivempi jonkin luonnollisen syyn takia, vai voiko asiaan vaikuttaa esim. joku ihmisen aikaisempi toiminta alueella. Näytepisteiden alueella ei ole toistaiseksi tehty massastabilointia, ja se, miten näytepisteen PL129 alueella tullaan toimimaan, ei ole vielä selvillä. (Ramboll 2014).

Taulukko 5.1. Honkasuo. Näytepisteiden PL127, PL128 ja PL129 turvenäytteiden indeksiominaisuudet. (Ramboll 2014, muokattu).

Tutkimuspiste	Syvyys [m]	Silmämääräinen maalaji	w [%]	Hh [%]	pH
PL127	0,5-1,5	KTv H5	1399	95,3	3,7
	1,5-2,5	MTv H8	1004	86,2	4,5
PL128	0,5-1,5	KTv H5	1004	97,3	3,3
PL129	0,5-1,5	Kuiva KTv?	194	92,2	3,3
	1,5-2,5	Kuiva KTv?	187	88,7	3,1



Kuva 5.1. Tutkimuspisteiden PL127, PL128 ja PL129 sijainti Honkasuon kohteessa (Ramboll 2014, muokattu).

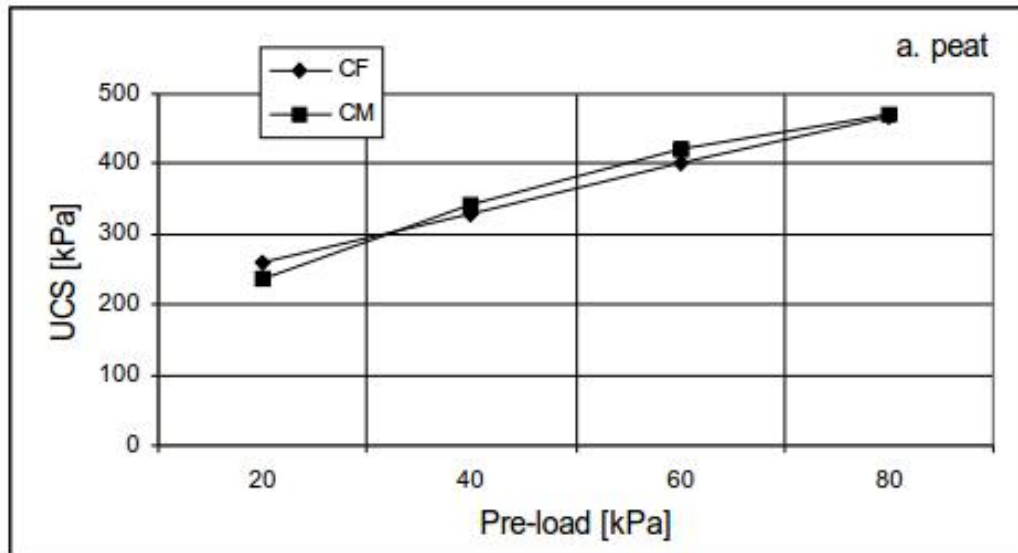
Taulukko 5.2 Honkasuo. Stabiloitavuuskoetuloksia näytepisteistä PL127 ja PL129. (Ramboll 2014).

Tutkimuspiste	Runkomateriaali	Sideaine	Sideainemäärä [kg/m ³]	Puristuslujuus 28 vrk [kPa]	Puristuslujuus 90 vrk [kPa]
PL127	Tv-seos 1:1	PlusCem	80	109	147
			110	185	194
			140	230	
		SRCem	80	176	
			110	194	
		SRCem+LT	90+110	169	173
		PlusCem	70+100	84	94
		+PKT	70+200	154	
PL129	KTv 0,1-1,5 m ja 1,5-2,5 m 1:1 seos (turve alkuperäisellä w-tasolla)	SRCem	80+100	113	122
			90+100		
		SRCem	100	36	34
			150	51	53
		SRCem+LT	100+200	32	36
			125+125	30	39
		SRCem+PKT	100+100	48	52

5.2 Näytteiden esikuormitus

Turvenäytteitä valmistettaessa näytesylinterit asetetaan sideaineen sekoittamisen jälkeen esikuormituspenkkiin, jossa stabiloituun massa kohdistuu pystykuormitus. Tavallisesti pystykuormituksen paine on 18 kPa ja esikuormitusaika esimerkiksi 7, 14, 28 tai 56 vuorokautta. Pystykuormituksen vaikutuksesta stabiloitu massa painuu kokoon lujittumisvaiheen aikana, erityisesti lujittumisen alkuvaiheessa. Kokoon painuminen voi olla erittäin voimakasta. Tämän kokoonpuristumisen vaikutuksesta stabiloitu massa tiivistyy ja samalla massasta poistuu vettä. Esikuormituksella saavutetaan merkittävä vaikutus stabiloinnin lujuuteen. (Forsman et al. 2014). Kuvassa 5.2 on esitetty turvenäytteiden esikuormituksen vaikutusta stabiloitujen näytteiden lujuuteen Kivikon turpeella.

Kokemusten perusteella esikuormitettujen näytteiden laboratoriolujuudet vastaavat huomattavasti paremmin työmaaolosuhteissa saavutettavia lujuuksia, kuin ilman esikuormitusta tutkittujen näytteiden lujuudet. Samalla saadaan myös suuntaa-antavaa tietoa stabiloitavan turvekerroksen odotettavasta kokoonpuristumasta ja sen suuruusluokasta. Kokeissa käytettävää esikuormitusta varioimalla voidaan myös arvioida mahdollisuuksia vaikuttaa stabiloinnin lujittumiseen ja painumakäyttäytymiseen, jos rakentamisen yhteydessä stabiloitavalla alueella käytettäisiin painopengertä. (Forsman et al. 2014).



Kuva 5.2. Esikuormituksen vaikutus stabiloitujen näytteiden puristuslujuuteen Helsingin Kivikosta otetuilla turvenäytteillä (EuroSoilStab 2004).

Esimerkkikohde turvenäytteet Virosta

Eräässä projektissa havaittiin stabilointikokeissa koekappaleiden puristuslujuuden jäävän murto-osaan odotetusta. Kokeet toistettiin toisessa laboratoriossa. Stabilointikokeissa käytetyt maalajit, sideaineet, lujittumisaajat ja mitatut puristuslujuudet kullekin näytteelle on esitetty taulukossa 5.3. Koska kokeissa käytettiin eri sideainesekeituksia, eri näytteenotto-pisteistä otettuja turvenäytteitä ja eri lujittumisaikoja, tuloksia ei voida täysin verrata toisiinsa. Tutkimuksen tulosten ja muun käytettävissä olevan tiedon perusteella kuitenkin arveltiin, että ensimmäisen laboratorion stabilointikoenäytteitä ei ollut esikuormitettu lainkaan lujittumisaikana, mikä johti alhaiseen lujuuteen. (Dettenborn & Forsman 2015).

Taulukko 5.3: Kahden eri laboratorion tekemissä ”rinnakkaisissa” stabilointikokeissa havaittuja puristuslujuuksia (Dettenborn & Forsman 2015).

Maalaji ja sideaine	Puristuslujuus (UCS)	Laboratorio
Turve 1 l / sementti 200 g / hiekka 0...0,8 200 g	24 kPa (56 d)	1
Turve 1 l / sementti 200 g	90 kPa (28 d)	2
Turve 1 l / sementti 200 g / oil shale ash 200 g	18,5 kPa (56 d)	1
Turve 1 l / sementti 200 g / lentotuhka1 200 g	275 kPa (28 d)	2
Turve 1 l / sementti 200 g / lentotuhka3 200 g	225 kPa (28 d)	2

5.3 Vesimäärän lisäyksen vaikutus

Silloin, kun massastabiloitavan runkoaineen vesipitoisuus voi kentällä vaihdella ja muuttua siitä, mitä se on ollut näytteenottovaiheessa, tulisi tutkia vesipitoisuuden mahdollisen muutoksen vaikutusta stabiloitavuuteen.

Esimerkkikohde Honkasuo

Honkasuolla yhden näytteenottopisteen turvenäytteillä testattiin, miten veden lisäys voisi vaikuttaa stabiloitavuuteen. Kyseessä oli poikkeuksellinen turvenäyte, jossa vesipitoisuus oli 187-194 %. Näytteellä tehtiin stabiloitavuuskokeet alkuperäisellä vesipitoisuudella (noin 200 %) ja lisätyllä vesipitoisuudella (noin 400 %). Alkuperäisellä vesipitoisuudella

havaittu heikko lujittuminen huonontui vielä merkittävästi vesipitoisuuden kasvaessa. Näytteiden sijainnit ja tunnukset on esitetty edellä kuvassa 5.1. (Ramboll 2014).

Taulukko 5.4. Honkasuo, stabiloitavuuskokeet. Veden lisäyksen vaikutus lujittumiseen. Esimerkkituloksia. (Ramboll 2014, muokattu).

Runkomateriaali	Sideaine	Sideainemäärä [kg/m ³]	Puristuslujuus 28 vrk [kPa]	Puristuslujuus 90 vrk [kPa]
PT129: KTV 0,1-1,5 m ja 1,5-2,5 m 1:1 seos (turve alkupe- räisellä w-tasolla 187-194 %)	SRCem	100	36	34
		150	51	53
PT129: KTV 0,1-1,5 m ja 1,5-2,5 m 1:1 seos (lisävesi, stabi- loitavan turpeen w ~400 %)	SRCem	100	18	
		150	21	22

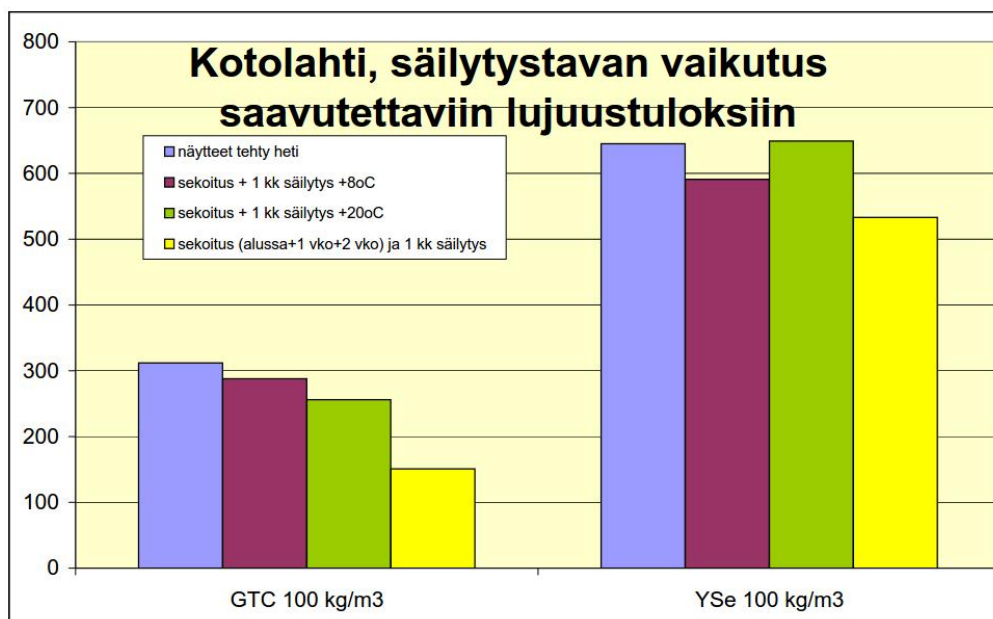
5.4 Näytteiden säilytyksen vaikutus

Esimerkkikohde Kotolahti

Kotolahden ratapihan stabilointikohteesta otettuja maanäytteitä säilytettiin näytteenoton ja homogenisoinnin jälkeen useita kuukausia ennen stabiloitavuuskokeiden koekappaleiden valmistamista. Pitkähköstä säilytysjaksosta aiheutuneen runkomateriaalin laadun muuttumisen takia stabiloituvuus oli aiemmissa kokeissa havaittua heikompaa. Tuloksissa esiintyneiden eroavaisuuksien takia Ramboll Oy:n laboratoriossa testattiin perusteellisemmin Kotolahden savisen liejun säilytys- ja käsittelytavan vaikutusta stabilointitulokseen. Tutkimuksissa käytettiin sideaineina kipsi-kalkki-sementtiseosta (GTC) ja yleissementtiä. Kokeissa tutkittiin seuraavat tapaukset:

- (1) Koekappaleet tehtiin heti maanäytteen saavuttua laboratorioon
- (2) Runkomateriaali homogenisoitiin ja sitä säilytettiin kylmiössä (+8 °C) yhden kuukauden ajan ennen koekappaleiden tekemistä
- (3) Runkomateriaali homogenisoitiin ja sitä säilytettiin huoneenlämmössä (n. +20 °C) yhden kuukauden ajan ennen koekappaleiden tekemistä
- (4) Runkomateriaali homogenisoitiin ja sitä säilytettiin huoneenlämmössä (n. +20 °C) yhden kuukauden ajan ennen koekappaleiden tekemistä. Säilytyksen aikana massaa sekoitettiin yhden ja kahden viikon kohdalla.

Koesarjan stabiloitavuuskokeiden tuloksia on esitetty kuvassa 5.3. Tuloksista nähdään, että maanäytteiden säilytyksellä on selvä vaikutus stabiloitavuuskokeissa saavutettavaan lujustasoon. Tässä koesarjassa muutos ei kuitenkaan ollut läheskään sitä suuruusluokkaa, kuin Kotolahden tutkimuksissa suurimmillaan. Pienempiin eroihin vaikuttivat koesarjassa käytettyjen runkoainenäytteiden lyhyt säilytysikä verrattuna alkuperäisissä tutkimuksissa käytettyihin runkoainenäytteisiin. Pidemmällä säilytysajoilla erot mitä ilmeisimmin korostuvat, ja tämä suuntaus on nähtävissä myös koesarjan näytteistä. Koesarjan näytekappaleiden lujudet olivat suurempia kuin varsinaisten koekappaleiden, mikä saattaa häivyttää tai tasata eroja jonkin verran. (Ramboll 2007). Kotolahden stabilointikohdetta on esitelty tarkemmin liitteessä 1.



Kuva 5.3. Laboratoriossa havaittu runkomateriaalinäytteiden säilytystavan vaikutus stabi-loitavuuskokeissa saavutettaviin lujuustuloksiin. Sideaineina kipsi-kalkki-sementtiseos (GTC) ja yleissementti (YSe). (Ramboll 2007).

5.5 Lujuus laboratoriossa vs. in situ

Massastabiloinnin onnistuminen on monien tekijöiden summa. Kentällä tehdyillä laadun-valvontakairauksilla havaittu stabiloinnin lujuus on usein pienempi, pahimmassa tapauk-sessa vain murto-osa, laboratoriossa tehdyissä stabi-loitavuuskokeissa saavutetusta lujuu-desta. Maastossa sekoitustyön jälki on monesti epähomogeenisempaa ja stabi-loitu massa saattaa tiivistyä huonommin kuin laboratoriossa (ALLU Finland Oy 2007). Lujuuksien välistä eroa ei ole pystytty täysin selittämään. Liikenneviraston Syvästabilointiohjeessa (2010) on esitetty joitain korjauskertoimia laboratoriossa mitatuille puristuslujuuksille, mutta kertoimet eivät ulotu massastabiloinnissa tyypillisesti saavutettaviin lujuuslukemiin. Hainari (2016) on esittänyt diplomityössään kokemuseräisen arvion, jonka mukaan maas-tossa saavutettava lujuus on usein n. 70 % laboratoriolujuudesta. Lujuuksien välinen korre-laatio on kuitenkin hyvin tapauskohtainen.

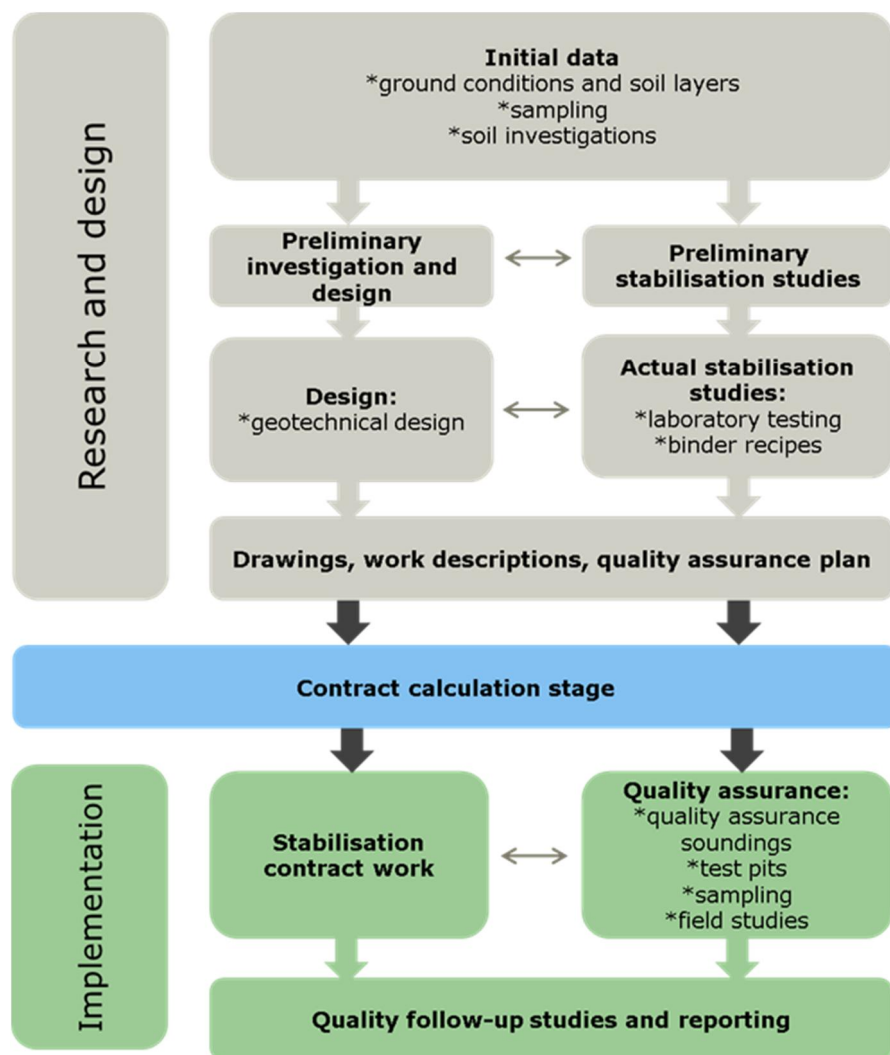
Esimerkkikohde Lempola

Leivo (2009) havaitsi tutkimuksessaan, että työmaalla saavutettu stabilointijälki on epä-taisempaa kuin laboratorio-olosuhteissa. Työmaalla stabi-loitu savi on koostumukseltaan epähomogeenista ja sen vesipitoisuus-, tiheys- ja lujuusominaisuuksien vaihtelu on suu-rempaa, kuin laboratoriossa stabiloidulla näytteillä. Kuitenkin diplomityössään Leivo (2009) havaitsi, että kentällä stabi-loitujen savien puristuslujuudet olivat kahta poikkeusta lukuun ottamatta huomattavasti suurempia kuin vastaavalla sementtimäärällä stabi-loitujen laboratorionäytteiden lujuudet. Tämän todettiin johtuvan mm. kentällä stabi-loitujen savien pienemmistä vesipitoisuuksista ja suuremmista tiheyksistä sekä siitä, että kentällä savi tiiv-visty laboratoriossa stabi-loitua savea paremmin.

6 Massastabiloinnin suunnittelun vaikutus stabiloinnin laatuun ja toteutettavuuteen

6.1 Yleistä

Massastabilointihankkeen suunnittelu alkaa toteutettavuusselvityksellä, jonka aikana tarkastellaan, onko massastabilointia ylipäättään mahdollista toteuttaa. Useimmissa kohteissa pohjamaa on lujitettavissa massastabiloinnilla, mutta on olemassa kohteita, joissa pohjamaa tai jokin sen kriittinen kerros ei ole stabiloitavissa taloudellisesti mielekkäällä sideainemäärällä, eikä kohteita kannata suunnitella massastabilointitekniikkaan perustuen. (Forsman et al. 2014). Massastabilointiprosessin kulkua on esitetty kuvassa 6.1.



Kuva 6.1. Massastabilointiprojektin päävaiheet (Forsman et al. 2014).

6.2 Lähtötiedot

Suunnittelun lähtötietoina käytetään luvussa 4 esitellyillä laboratoriotutkimusmenetelmillä määritettyjä tuloksia sekä alueella tehtyjä pohjatutkimuksia. Tarvittavan lähtötiedon määrä vaihtelee massastabiloitavan kohteen vaatimustason mukaan. Selväpiirteiseen maakerrosrajaan ulottuvassa massastabiloinnissa pohjatutkimusten määrä voi olla vähäinen verrattu-

na kohteeseen, jossa stabilointi tehdään määräsyyvyyteen tai stabiloitavan kerroksen alapuolelle jätetään painuvia kerroksia. Alustava arvio massastabiloinnin soveltuvuudesta kohteeseen voidaan yleensä tehdä varsin vähäisillä ja puutteellisilla lähtötiedoilla, jos alueelta on aikaisempaa syvästabilointikokemusta. Lähtötietoja tarvitaan jo alustavaa teknistä-taloudellista arviota varten sitä enemmän, mitä tuntemattomampi alue ja maaperä ovat kyseessä. Mikäli stabiloitavan materiaalin stabiloituvuudesta ei ole mitään aikaisempaa kokemusta, on alustavankin arvion tekeminen luotettavasti mahdotonta. (Forsman et al. 2014).

Ennen massastabiloinnin suunnittelun aloittamista kohteesta selvitetään maakerrosten rajat, maan indeksiominaisuuden, kuten rakeisuus, vesipitoisuus ja humuspitoisuus, maakerrosten lujuus- ja painumaominaisuudet, pohja- ja orsiveden taso ja vaihteluväli sekä alueella olemassa olevat rakenteet. Myös maan kemialliset erityispiirteet, kuten pH-arvo, sulfidi- ja kloridipitoisuus sekä pilaantuneisuus on hyvä selvittää. Varsinainen massastabiloinnin suunnittelutyö alkaa yleensä lisäpohjatutkimusten ohjelmoinnilla. Pohjatutkimusten kairausdiagrammien ja näytetietojen avulla ohjelmoidaan stabiloitavuustutkimukset ja tehdään kohteen geotekninen suunnittelu. (EuroSoilStab 2004; Forsman et al. 2014).

6.3 Stabiloinnin mitoitus

6.3.1 Mitoituksen periaatteet

Massastabiloinnin mitoituksessa stabiloitu maa oletetaan yhtenäiseksi, homogeeniseksi kontinuumiksi. Mitoituksessa on otettava huomioon stabiloinnin sekoitukseen ja homogeenisuuteen liittyvät epävarmuustekijät. Massastabiloinnin mitoituksessa käytetään liukupintalaskelmia ja painumalaskelmia. (EuroSoilStab 2002).

Liukupintalaskenta

Massastabiloinnin stabiliteettitarkastelussa on ensimmäiseksi tarkistettava maarakenteen vakavuus sekä ilman stabilointia että stabilointi huomioon ottaen. Ilman stabilointia tehdyllä lähtötilanteen stabiliteettilaskelmalla arvioidaan stabiliteetin merkittävyyttä stabiloinnin mitoituksessa. Yleensä kohteen stabiliteetti ilman stabilointia lasketaan ympyräliukumenetelmällä. Laskelmassa on otettava huomioon penkereen tai leikkauksen muoto, mahdollinen vastapenger ja kevennysleikkaukset sekä mahdolliset pengerkevennykset tai massanvaihdot. (Forsman et al. 2014).

Massastabiloidun rakenteen stabiliteetti voidaan määrittää ympyräliukupintojen avulla. Mikäli stabiloidun kerroksen alle jää heikko tai kalteva stabiloimaton kerron, on stabiliteettilaskelmissa hyvä käyttää myös yhdistelmäliukupintoja. Laskelmissa käytetään massastabiloinnin leikkauslujuutena valittua redusoimatonta mitoituslujuutta. Stabiloimattoman pohjaan lujuus redusoidaan. Sideainemäärä valitaan siten, että mitoituslujuus saavutetaan varmasti. Massastabiloidun rakenteen stabiliteettitarkastelussa voidaan ottaa huomioon myös passiivipuolella sijaitseva stabilointi. (Liikennevirasto 2010).

Varmuus massastabiloidun rakenteen sortumaa vastaan määritetään rakennuttajan määrämällä tai rakennuttajan kanssa sovitulla menettelyllä. Suomessa käytetään eurokoodijärjestelmää tai kansallisen menettelyn mukaista Pohjarakennusohjetta. Stabiliteettilaskennassa käytetään eurokoodin mitoituslupaa 3, jossa osavarmuusluvut kohdistetaan kuormiin ja

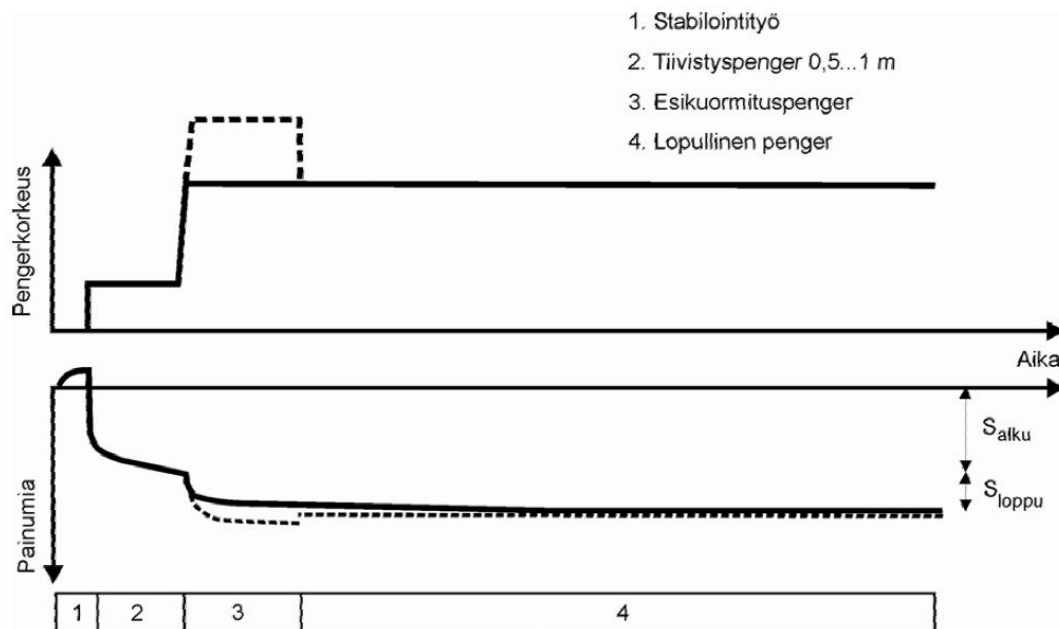
maan lujuusparametreihin. Pohjarakennusohjeen mukaisessa mitoituksessa käytetään kokonaisvarmuuslukuja. (Forsman et al. 2014).

Painumalaskenta

Stabilointityön aikana maa-aines kuohkeutuu, mikä nostaa stabiloitavan kerroksen pintaa stabilointivaiheessa. Tämä johtuu siitä, että stabilointityössä stabiloitavaan kerrokseen syötetään sideaine paineilmalla stabilointilaitteiston sekoitinkärjen kautta. Kuohkeutumista lisää itse sekoitustyö. (Forsman et al. 2014).

Suurin massastabiloidun kerroksen painuma tapahtuu, kun stabiloidun kerroksen alkutiivistys tehdään kuormittamalla stabilointia tiivistyspenkereellä. Tiivistyspenkereen paksuus on yleensä 0,5...1 m. Joissain tapauksissa jäykän massastabiloinnin tiivistys voidaan tehdä tela-alustaisella kaivinkoneella yliajaen. Tiivistyspenkereen annetaan vaikuttaa koko massastabiloinnin lujittumisajan.

Mikäli on tarpeen minimoida massastabiloidun rakenteen käytön aikaiset painumat, voidaan massastabiloitu kerros esikuormittaa ylipenkereellä. Käytön aikainen painuminen jatkuu pidempään, mikäli stabiloidun kerroksen alle jää stabiloimattomia kerroksia, joiden painumia ei saada poistettua esikuormittamalla. Esikuormitus on yleensä välttämätön turvekerroksia stabiloitaessa. Varsinainen, lopullinen pengerrakennetaan joko tiivistyspenkereen päälle tai tarvittaessa tiivistyspenkereen materiaalit korvataan esimerkiksi tien rakennekerroksilla. Tiivistymisen eteneminen tulee varmistaa painumamittauksin ennen lopullisen penkereen rakentamista. (Forsman et al. 2014). Kuvassa 6.2 on esitetty massastabiloinnin painuman vaiheet esikuormitettuna ja ilman esikuormitusta.



Kuva 6.2. Massastabiloinnin painuman vaiheet esikuormitettuna ja ilman (Liikennevirasto 2010).

Massastabiloidun kohteen rakentamisaikataulu suunnitellaan aina tapauskohtaisesti, mutta päällystetyn rakenteen, kuten tien, suuntaa-antavan aikataulun arvioinnissa voidaan käyttää seuraavaa:

0,5-3 kk, tiivistyspenger

1...3 kk, lopullinen tiepenger (vaiheittain korottaen)

1...6 kk, yli-/esikuormituspenger (stabiliteetti yms. huomioiden)

2...6 kk, kantava kerros

3...9 kk, päällyste

Painumamittauksia suositellaan tehtäväksi rakentamisen aikataulun tarkistamiseksi ja seurantamittaushavaintojen kerryttämiseksi. Seurantamittaukset voidaan tehdä esim. painumalevyillä tai -letkuilla. (Liikennevirasto 2010).

6.3.2 Stabiloinnin liittyminen kovaan pohjaan

Lähellä kovaa pohjaa voi olla esimerkiksi maakerroksen pinnan epätasaisuutta, joka haittaa massastabilointityön toteutusta, ja stabiloitavan kerroksen ja kovan pohjan väliin voi jäädä heikompi, stabiloitumaton kerros. Massastabiloinnin alapinnan ollessa kitkamaakerroksessa, on kaltevan maanpinnan tai sivukuormitetun rakenteen yhteydessä arvioitava stabiloinnin ja pohjamaan kontaktin laatu, eli onko mahdollista, että rajapintaan jää heikkousvyöhyke. Useissa tapauksissa on syytä olettaa, että massastabiloinnin ja alapuolisen maakerroksen kontakti ei ole täydellinen, mikä on otettava huomioon stabiliteettilaskelmissa. Kuvassa 6.3. on esitetty, kuinka liukupinta kulkee stabiloinnin ja kovan pohjan väliin jääneen heikomman kerroksen kautta. (Larsson 2006; Liikennevirasto 2010; Forsman et al. 2014).

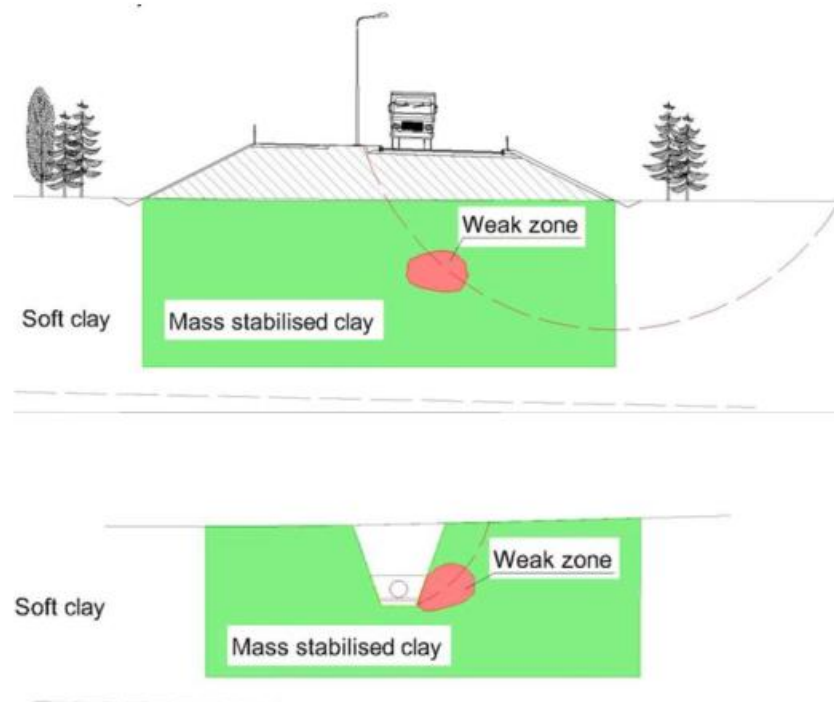


Kuva 6.3. Stabiloinnin liittyminen kovaan pohjaan. Liukupinta kulkee stabiloinnin ja kovan pohjan väliin jääneen stabiloitumattoman kerroksen kautta. (Larsson 2006, muokattu).

6.3.3 Heikot kohdat stabiloinnissa

Massastabiloinnille on tyypillistä sideaineen jakauman epähomogeenisuus, ja valmiiseen massastabiloituun maakerrokseen voikin jäädä paikallisia heikkousvyöhykkeitä. Rakenteen toimivuuden kannalta ei kuitenkaan ole yhdentekevää, missä pienet, paikalliset heikot kohdat sijaitsevat. Kuvassa 6.4. on esitetty paikallinen heikkousvyöhyke penkereen alla ja massastabiloitiin kaivetun kaivannon luiskassa. Penkereen tapauksessa paikallisella heikommalla kohdalla ei käytännössä ole merkitystä penkereen stabiliteettiin. Kaivannon luiskassa sijaitseva pienikin heikko kohta voi puolestaan vaarantaa kaivannon luiskan vakavuuden. Mahdollinen massastabiloinnin lujuuden hajonta on aina otettava huomioon mitoitettaessa luiskattua kaivantoa massastabiloituun kerrokseen. Mahdolliset heikot koh-

dat tulee toki ottaa huomioon myös penkereen mitoituksessa esimerkiksi mitoituslujuutta asetettaessa. (Forsman et al. 2014).



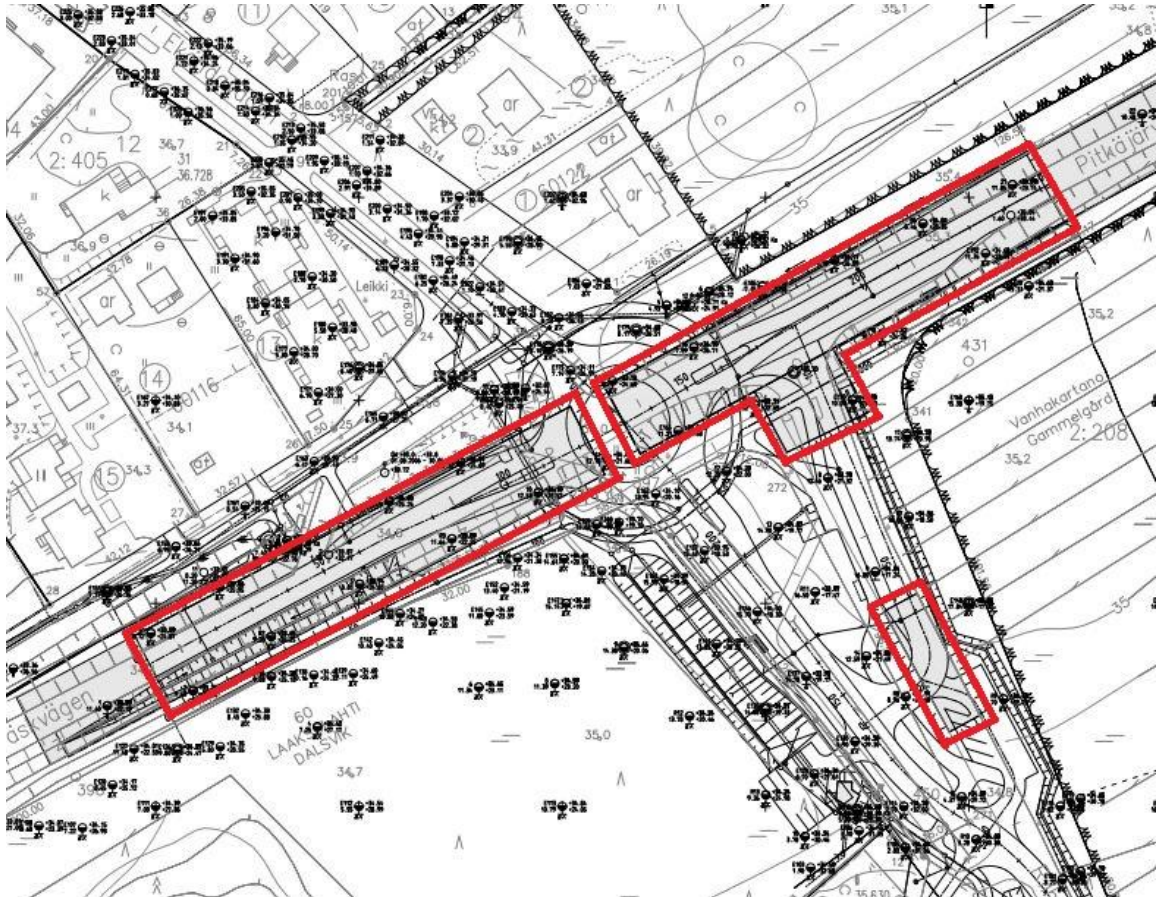
Kuva 6.4. Paikallisen heikon kohdan sijainnilla stabiloinnissa ei ole merkitystä laajan liukupinnan tapauksessa (yllä), mutta se voi vaarantaa kaivannon luiskan stabiliteetin (alla). (Forsman et al. 2014).

6.4 Esteet stabilointialueella

Massastabilointia suunniteltaessa on otettava huomioon mahdolliset stabilointialueella olevat esteet, jotka voivat haitata stabilointityötä. Näitä ovat mm. vanhat hirsiarinat, muut hylätyt rakenteet sekä maaperässä olevat suuret kivet ja kannot.

Esimerkkikohde Pitkäjärventien ja Riihiniityntien liittymä

Espoon Laaksolahdessa sijaitsevan Pitkäjärventien ja Riihiniityntien liittymän rakentamishankkeen suunnittelun yhteydessä havaittiin, että Pitkäjärventie oli perustettu puiselle, noin 19 metriä leveälle telalavalle. Ennen liittymän alueelle suunniteltua massa- ja pilaristabilointityötä alueella oli tehty koekuoppatutkimuksia, joiden perusteella hirsitelan yläpinta sijaitsi 1,6...1,7 metrin syvyydessä maanpinnasta. Myös Pitkäjärventien liittymäalueelta alkavan Riihiniityntien pohjanvahvistuksena oli hirsiarina. Kevytsoran ja hirsitelan yhdistelmälle oli tehty painumakorjaus 1980-luvun alussa, jolloin hirsitelat olivat olleet 2,1 metrin syvyydellä nykyisestä tien pinnasta. Ennen stabilointityön aloittamista alueella olevat hirsitelat poistettiin kaivamalla. Hirsitelojen poistosta syntyvät kaivannot täytettiin joko massastabiloitavalla materiaalilla tai hiekalla, jonka läpi massa- ja pilaristabilointi oli mahdollista tehdä. (Ramboll 2009). Kuvassa 6.5. on esitetty liittymän alueella olleen hirsiarinan laajuus harmaalla sekä poistetun hirsiarinan laajuus punaisella ääriviivalla.



Kuva 6.5. Vanhan hirsiarinan kokonaislaajuus (harmaalla) sekä poistetun hirsiarinan laajuus (punainen ääriiviiva) Pitkäjärventien ja Riihiniityntien liittymän alueella (Ramboll 2009, muokattu).

Esimerkkikohde Kotolahden ratapiha

Kotolahden stabilointialueella Kotkassa stabilointityötä haittasivat stabiloitavan massan joukossa olleet suuret kivet. Kivet olivat päätyneet massan joukkoon aiemmin rautatiepenkereen kohdalle tehdystä massanvaihdesta (Kuva 6.6).



Kuva 6.6. Stabiloitavan massan joukosta poistettuja isoja kiviä Kotolahdessa Kotkassa (Forsman 2015).

Esimerkkikohde Vantaan Ikea

Vantaan Ikean työmaan pohjatutkimuksissa havaittiin vanhan täytön olevan varsin epämääräistä, ja sisältävän mm. ylijäämämaita, rakennusjätettä, multaa, savea ja kiviä. Lisäksi täytön joukossa oli isoja kantoja useammassa kerroksessa. Tavaratalon tontin pohjaolosuhteet olivat muutoinkin erittäin hankalat. Tavaratalon parkkipaikalla ja piha-alueella tehtiin sekä pilari- että massastabilointia. Työn aikaisten esteiden poistamisen jälkeen varsinainen massastabilointi onnistui ja lujittui hyvin. Tarkempia tietoja kohteesta on esitetty liitteessä 2. (Ramboll 2002; Koivisto et al. 2004).

6.5 Työmaajärjestelyt

Ennen töiden aloittamista tulee varmistaa pääsy stabilointialueelle, maan kantavuus työkohteita varten, alueella olevat sekä maanpinnan ylä- että alapuoliset esteet sekä stabilointialueen ympäristössä olevat rakenteet, jotka voivat haitata töitä tai vaurioitua työn aikana. Työmaajärjestelyt tulee myös tehdä niin, että stabilointityö ei aiheuta haittaa muille mahdollisille työmaan toiminnoille tai samanaikaisille työvaiheille. Työmaajärjestelyissä tulee ottaa huomioon laitteiston ja työmaan aikaisen toiminnan kannalta tarpeellinen tila parkkipaikoille, autoille, sideainesäiliöille, kiviainesautojen kääntöpaikoille, varastointialueille ja tarvittaessa siiloille. Sideainetankkauksen tukikohta vie eniten tilaa, ja sille on hyvä varata noin 10 m x 20 m alue. Tukikohdan tulee myös sijaita kantavalla alustalla. Erityisesti pehmeät pohjamaat työmaan alueella voivat haitata koneiden liikkumista ja etenemistä. Pehmeisiin alueisiin voidaan varautua erilaisilla apuvälineillä, kuten puu- tai teräsarinoilla, hirsiteloilla, ponttooneilla tai muilla väliaikaisilla työalustoilla. (EuroSoilStab 2004; Forsman et al. 2014).

Sideaineen saatavuus työmaalla tulee aina varmistaa, ja sideaineen varastointiin työmaalla tulee varautua. Useimmat sideaineet reagoivat kosteuden kanssa, ja ne tulisiikin säilyttää kuivissa ja suljetuissa säiliöissä. Tämä varotoimi vähentää myös pölyämistä työmaalla. Pitkää säilytysaikaa ei suositella millekään sideaineelle, sillä se voi vaikuttaa sideaineen reaktiivisuuteen ja koostumukseen. Sideaineen tulee olla kuivaa ja pulverimaista, kun sitä syötetään painesyöttimellä sekoitinyksikköön. (EuroSoilStab 2004; Forsman et al. 2014).

Esimerkkikohde Kose-Mäo, Viro:

Kose-Mäön koestabilointikohde sijaitsee metsäalueella Tallinna-Tarto tien varrella. Kohteen urakkalaskentatiedoista puuttui tieto alueelle johtavan tien painorajoituksesta ja toimenpiteistä, joita rajoitus aiheuttaa. Tämän tiedon esiintuomisella olisi vältetty asiasta riitely urakoitsijan kanssa. (Forsman 2017). Kohdetta on esitelty tarkemmin Liitteessä 3.

7 Massastabiloinnin toteutusvaiheessa huomioon otettavia tekijöitä

7.1 Suunnitelman noudattaminen

Massastabilointikohteen työselityksessä määritetään mm. työohjeet, toimintatavat, stabiloidun materiaalin tekniset vaatimukset ja laadunvarmistussuunnitelma kunkin kohteen erityisolosuhteet huomioiden. Työselityksessä määritetään ja ohjeissa otetaan huomioon myös stabiloitava runkomateriaali ja sen laatuvariaatio, sideaineet, lopullinen, käytettävissä oleva lujittumisaika, vuodenaika sekä muut olosuhteet. Tilaajasta, kohteesta ja kohteen vaativuudesta riippuen massastabilointikohteen työselitys voi olla kokonaisuudessaan tiettyyn kohteeseen räätälöity tai se voi pohjautua pitkälti yleiseen työselitykseen ja laatuvaatimuksiin, joita tarkennetaan tarvittavin osin. Yksityiskohtaisen ohjeistuksen avulla pyritään minimoimaan rakennusaikaisten riskien toteutuminen ja varmistamaan laadukas ja suunnitelmien mukainen työn toteutus. (Forsman et al. 2014).

Esimerkkikohde Kulomäki

Massastabiloinnin onnistumisen kannalta tärkeää on noudattaa suunnittelijan laatimaa massastabilointisuunnitelmaa. Kulomäen täyttömäen koerakenteessa alkuperäisestä suunnitelmasta poikettiin useita kertoja, mikä johti stabilointityön vaikeutumiseen ja lopulta koerakenteen osittaiseen epäonnistumiseen. Koerakenteesta ei saatu luotettavalla tavalla tutkittua niitä asioita, joita suunnitelman mukaan oli tarkoitus tutkia. (Kuismin 2017). Kulomäen koerakennetta on esitelty tarkemmin Liitteessä 4.

Kulomäen koerakenteeseen ei saatu suunnitelman mukaista saviainesta, joten stabilointialtaisiin päädyttiin läjittämään myös kuivakuorisavea ja osittain hiekkaa sisältävää savimassaa. Koerakenteen paikkaa jouduttiin myös siirtämään, eikä alkuperäisiä, jo täytettyjä altaita ei voitu stabiloida. Näistä altaista oli otettu savinäytteet, joiden indeksiominaisuudet oli tutkittu laboriokokein. Savinäytteistä oli myös valmistettu koekappaleet ja tehty stabiloitavuuskokeet eri sementtimäärillä. Uusien altaiden savelle ei enää tehty stabiloitavuuskokeita, ja savesta tutkittiin vain vesipitoisuus ja rakeisuus. (Kuismin 2017).

Suunnitelmasta poikkeamisesta seurasi se, että stabiloinnin runkoaine oli erilaista, kuin laboriokokeissa tutkittu savi. Näin ollen myös runkoaineen stabiloitavuus poikkesi stabiloitavuuskokeiden tuloksista. (Kuismin 2017).

7.2 Aikataulu

Aikataulun noudattaminen stabilointityössä on erityisesti kustannuskysymys. Tärkeää on huolehtia siitä, että stabilointityö ei haittaa tai hidasta muiden samanaikaisten tai stabilointityön jälkeisten työvaiheiden etenemistä. (EuroSoilStab 2004). Toisaalta yksi merkittävimmistä massastabiloinnin homogeenisuuteen ja lujuuteen vaikuttavista tekijöistä on juuri sekoitustyöhön käytetty aika (Jelusic 2000). Massastabilointityön aikataulun suunnittelussa tuleekin varata riittävästi aikaa sekoitustyölle, ja ottaa tämä huomioon työsuoritetta laskettaessa.

Esimerkkikohde Kulomäki

Massastabiloinnin aikataulu voi vaikuttaa stabiloinnin lopputulokseen myös muulla tavoin, kuin sekoitustyöhön käytetyn ajan kautta. Kulomäen koerakenteessa stabilointialtaiden täyttäminen kesti suunniteltua pidempään, ja altaissa oleva savi pääsi kuivumaan ennen

stabilointia. Stabilointityön mahdollistamiseksi koealtaisiin ajettiin runsaasti vettä notkistamaan savimassaa. (Kuismin 2017).

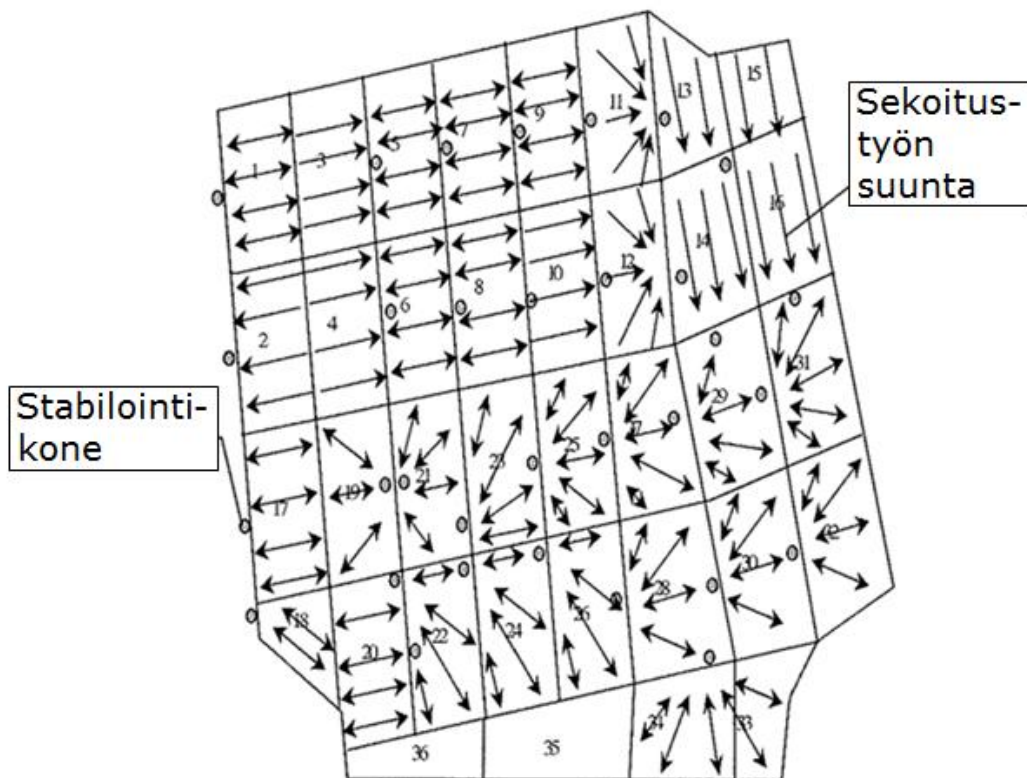
7.3 Sekoitustyö

Sideaineen tasainen jakautuminen stabiloitavaan ainekseen vaikuttaa merkittävästi saavutettavaan lujuuteen. Sideaineen sekoitustyö häiritsee maaperää, jolloin maan lujuus laskee usein alle häiriintymättömän lujuuden. Mikäli sideainetta ei saada sekoitettua maaperään tasaisesti, voi sekoitustyön vaikutuksesta maaperään jäädä paikallisia heikkousvyöhykkeitä, joilla voi olla paikoin stabiloinnin lujuutta heikentävä vaikutus. (Jelusic 2002).

Jelusicin (2002) mukaan sideainemäärän ja -jakauman lisäksi myös onnistuneella sekoitustyöllä on vaikutusta massastabiloinnin lujittumiseen. Ruotsalaisilla turpeilla tehtyjen stabilointitutkimusten tuloksista voitiin päätellä, että suurin lujuus saavutettiin siellä, missä sekoitusta oli tapahtunut eniten, eikä siellä, missä sideainejakauma oli optimaalinen. Onnistuneen sekoitustyön tärkeys korostui etenkin sementtiä sideaineena käytettäessä, sillä sementin lujittuminen perustuu sideainereaktion reaktiotuotteiden muodostumiseen paikallisesti sideainerakeiden ympärille (Åhnberg 2006).

Esimerkkikohde Leppävaara

Jelusic (2000) käsitteli tutkimuksessaan erilaisia sekoituskuvioita ja -työkaluja Leppävaarassa sijaitsevassa massastabilointikohteessa. Tutkimuksessa todettiin, että sekoituskuvioilla oli jonkin verran vaikutusta stabiloinnin homogeenisuuteen ja lujuuteen, mutta paljon suurempi vaikutus oli käytetyllä sekoitustyökalulla. Tutkimuksessa suurimmaksi vaikuttavaksi tekijäksi nousi kuitenkin sekoitustyöhön käytetty aika. Tutkitut sekoituskuviot on esitetty kuvassa 7.1.



Kuva 7.1 Erilaisten sekoituskuvioiden kokeilua Leppävaarassa (Jelusic 2000, muokattu).

Esimerkkikohde Kulomäki

Kulomäen täyttömäen koerakenteessa havaittiin, että savimassan kuivuminen vaikeutti sekoitustyötä huomattavasti. Vaikka savialtaita kasteltiin runsaasti ennen varsinaista stabilointityötä, ei stabiloitavaa massaa saatu homogenoitua riittävästi, minkä vuoksi stabiloinnin lujuus jäi paikoin huomattavasti suunniteltua alhaisemmaksi. Laadunvalvontakairausien tuloksista voidaan myös päätellä, että joihinkin kohtiin altaita on saattanut jäädä suuria, kuivia savikokkeja, jotka eivät ole stabiloituneet lainkaan, vaan joiden lujuus perustuu ainoastaan saven kuivumiseen. (Kuismin 2017).

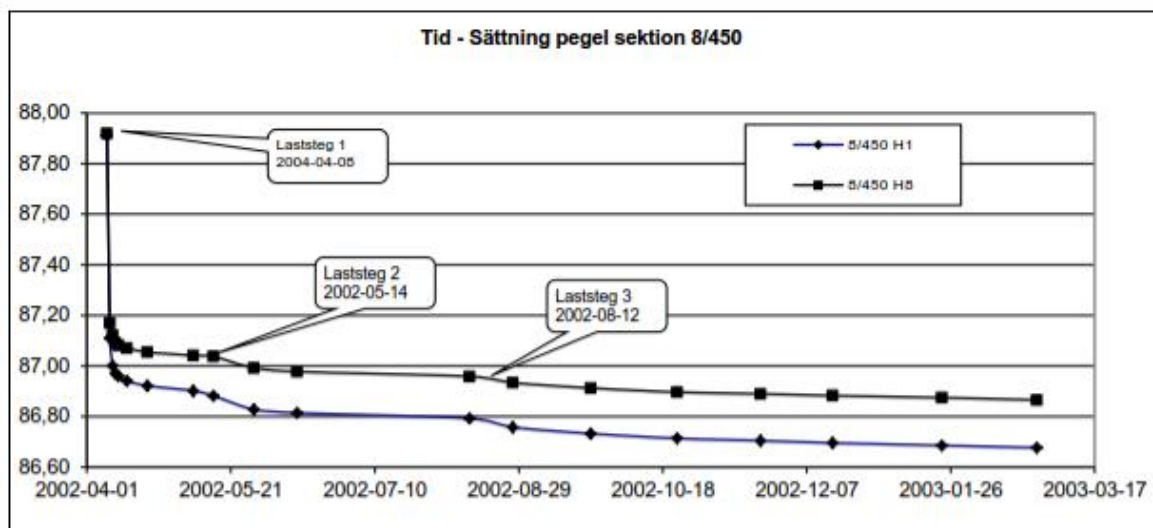
7.4 Tiivistyspenger

Massastabilointityön sideaineen syöttö paineilmaa käyttämällä sekä maakerroksen sekoittaminen löyhdyttävät stabiloitavaa maakerrosta. Massastabiloinnin päälle levitetään tiivistyspenger tiivistämään stabiloitua massaa, jolloin sideaineena käytetyn sementin reaktiot käynnistyvät nopeammin ja ylimääräinen vesi saadaan poistumaan rakenteesta. Yleensä tiivistyspenkereen paksuus on 0,5...1,0 metriä. Tiivistyspenger levitetään suodatinkankaan päälle. Tiivistyspenkereen käyttö on erityisen tärkeää turvetta stabiloitaessa, ja pengeri on tärkeää rakentaa saman työvuoron kuluessa, kuin stabilointi on tehty. Tiivistyspenger voi jäädä osaksi valmista rakennetta tai se voidaan poistaa ennen jatkorakentamista. (Forsman et al. 2014).

Esimerkkikohde Riksväg 44, Ruotsi

Ruotsissa sijaitseva Riksväg 44 välillä Uddevalla-Trollhättan rakennettiin moottoritiestandardin mukaan ja valmistui 2004. Noin 280 metrin pituisella osuudella, jossa tie ylittää Bräcken suon, käytettiin pohjanvahvistusmenetelmänä massastabilointia. Sideaineena käytettiin sementtiä noin 200 kg/m^3 . Suon pinnassa oli noin 5 metrin kerros turvetta, jonka vesipitoisuus oli jopa 2000 %, ja sen alla noin 20 metrin paksuinen savipatja. Turpeen massastabilointi tehtiin koko turvekerroksen syvyydeltä, minkä jälkeen aluetta esikuormitettiin tiivistyspenkereellä kuuden kuukauden ajan. Kokonaisuudessaan stabiloitiin 32000 kuutiometriä turvetta. (Carlsten & Olsson 2004).

Stabiloinnin jälkeen tiivistyspenger levitettiin stabiloinnin päälle. Työ suoritettiin kolmessa vaiheessa, ja kerralla levitetyn penkereen paksuus oli 1 m, eli 1/3 lopullisesta 3 m tavoitepaksuudesta. Ensimmäinen metrin kerros levitettiin suodatinkankaan päälle välittömästi stabiloinnin jälkeen, toinen metrin kerros 30 vuorokauden kuluttua ja viimeinen metrin kerros 60 vuorokauden kuluttua stabiloinnista. Kuuden kuukauden jälkeen ylipenger poistettiin. Suurin osa, noin 60-65 %, kokonaispainumasta tapahtui tiivistyspenkereen asettamisen jälkeisenä vuorokautena. Viikon kuluttua painumasta oli tapahtunut noin 80 %. (Carlsten & Olsson 2004). Painumamittausten tuloksia on esitetty kuvassa 7.2. Kuvasta käy ilmi myös se, missä vaiheessa tiivistyspengertä on korotettu.



Kuva 7.2. Painumamittausten tuloksia Uddevallassa. Kuvassa on esitetty myös tiivistyspenkereen korottamisajankohdat. (Carlsten & Olsson 2004).

Tiivistyspenger poistettiin, ja sen alta paljastui hyvin epätasainen massastabiloinnin pinta. Pinnassa havaittiin selkeitä ja säännöllisiä kohoumia ja painanteita. Kontrollimittaukset osoittivat pinnan aaltojen olevan 4 metrin, eli juuri yhden päivän etenemän mittaisia. Mahdollisena syynä pinnan aaltoilulle pidettiin painopenkereen levittämistä massastabiloinnin pinnalle. Penger levitettiin pyöräkuormaajalla, joka ilmeisesti aiheutti edetessään paineaallon ja siirsi vielä lujittumatonta massaa eteensä aiheuttaen ruudun etureunaan aallonharjan. Koska suurin osa stabiloidun massan kokonaispainumasta tapahtui ensimmäisen vuorokauden aikana, oli stabiloitu ruutu muuten päässyt jo painumaan, kun seuraavaa ruutua alettiin stabiloida seuraavana päivänä, mistä aiheutui ruudun keskelle kuoppa. (Carlsten & Olsson 2004). Esiinkaivettu massastabiloinnin pinta ja pinnan aaltoilua on esitetty kuvassa 7.3.



Kuva 7.3. Esiinkaivettu massastabiloinnin tiivistyspenkereen alla epätasaisesti painunut yläpinta Bräcken suolla, Uddevallassa, Ruotsissa. (Carlsten & Olsson 2004).

Esimerkkikohde Kose-Mäo, Viro

Ongelmia tiivistyspenkereen rakentamisessa havaittiin Virossa, Kose-Mäon kohteessa. Pienillä sideainemäärillä stabiloitujen turvealueiden lujittuminen tapahtui oletettua hitaammin, ja stabiloitua massaa siirtyi tiivistyspenkereen asentamisen johdosta viereisten stabilointiruutujen alueelle. Kohteessa käytetty 1 metrin paksuinen tiivistyspengeri suositeltiin tämän jälkeen rakennettavaksi kolmessa kerroksessa siten, että ensimmäinen 0,3 m kerros levitetään n. 24 tunnin kuluttua stabiloinnista, seuraava 0,3 m kerros n. 48 tunnin kuluttua ja viimeinen 0,4 m kerros 72...96 tunnin kuluttua stabiloinnista. (Forsman et al. 2009).

7.5 Pölyäminen

Massastabiloinnin kuivamenetelmässä sideaine syötetään maahan paineilman avulla puhaltamalla. Tästä työtavasta voi aiheutua merkittävää pölyämistä. Yksi mahdollinen ratkaisu pölyämisen välttämiseksi olisi käyttää niin sanottua wet mixing -metodia, eli sideaineen märkäsytöä. Nestemäisten sideaineitten käytön ongelmia Suomessa ovat kuitenkin alhaiset lämpötilat talvella sekä jo ennestään vesipitoiset savet. (Tielaitos 1996).

Esimerkkikohde Jätkäsaari, allasstabilointi, vaihe II

Jätkäsaarella toteutettiin ruoppausmassojen massastabilointia viidessä sedimenttialtaassa elo-marraskuussa 2012. Altaassa 3 tehtiin tuhkastabilointikokeilua, jossa sideaineseoksessa käytettiin sementtiä ja lentotuhkaa Helsingin Energian Hanasaaren voimalaitokselta. Tuhkasideainetta syötettiin stabiloitavaan maa-ainekseen kahdella eri menetelmällä. Ensimmäisessä menetelmässä kuivaa tuhkaa sisältävää sideaineseosta syötettiin maa-ainekseen painesyöttimen avulla, jolloin sideainekomponentit syötettiin runkoaineeseen samanaikaisesti. Toisessa menetelmässä esikostutettu tuhka levitettiin maa-aineksen pinnalle ja esikoitettiin runkoaineeseen ennen kuivien sideainekomponenttien lisäämistä. Kuiva tuhka on sementtiasideaineita kevyempää, mikä johtuu tuhkan suuresta hienoainepitoisuudesta. Tämän johdosta myös pölyäminen on runsaampaa kuin pelkällä kuivalla sementillä stabiloitaessa. Pölyäminen oli kuitenkin hallittua, kun kuivia sideaineita syötettiin runkoaineeseen samanaikaisesti. Sen sijaan pölyäminen oli runsaampaa silloin, kun stabiloitavat ruudut oli käsitelty ensin kostutetulla tuhalla. Esikostutettu tuhka on hydrofiilistä, eli se imee itseensä runkoaineessa olevaa vettä. Kun ylimääräinen vesi on sidottu esikostutetulla sideainekomponentilla, on kuivalla sementtihakaseoksella taipumus ”kuohua yli”, mikä ilmenee runsaana pölyämisenä. (Ramboll 2012). Stabiloinnin aiheuttamaa pölyämistä Jätkäsaarella on esitetty kuvassa 7.4. Jätkäsaaren stabilointikohdetta on esitelty tarkemmin liitteessä 5.

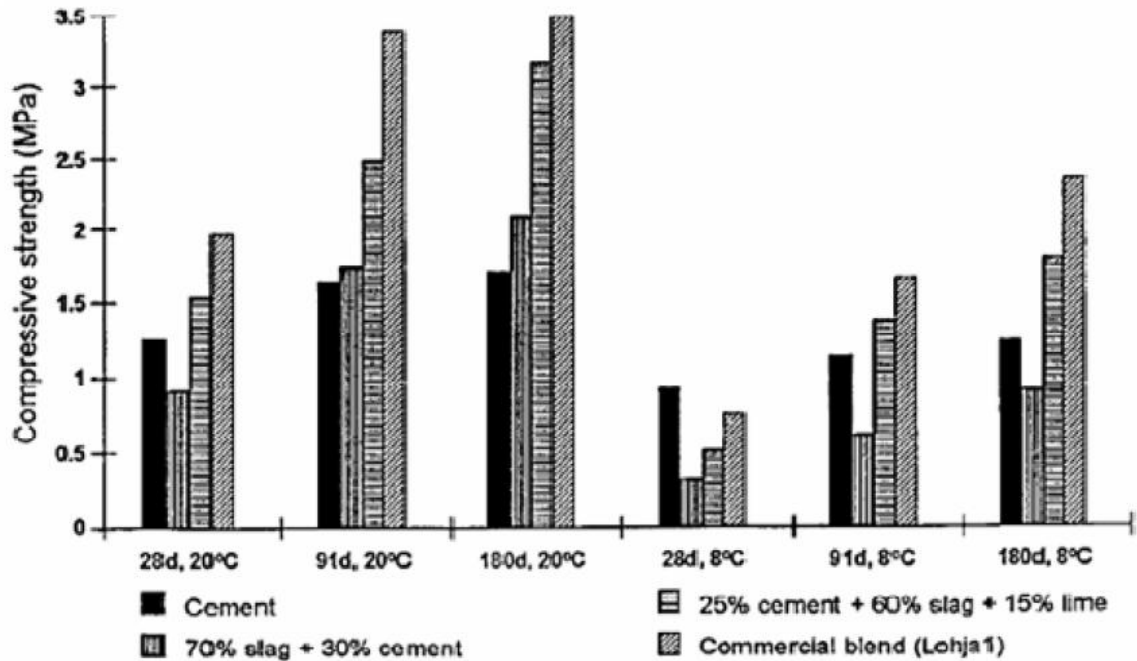


Kuva 7.4. Stabiloinnin aikaista pölyämistä Jätkäsaarella (Ramboll 2012).

7.6 Olosuhteet kohteessa

Sääolosuhteet ja lämpötila vaikuttavat myös stabilointityöhön ja sen onnistumiseen. Erityisesti pakkasen pitää ottaa huomioon työjärjestystä suunniteltaessa. Ankarat pakkaset hidastavat stabilointityötä, mutta massastabilointia on tehty Suomessa jopa $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilassa. Maan ollessa roudassa, voidaan aukikaivu joutua tekemään iskuvasaralla, mikä pienentää saavutettavaa työtehoa. (Forsman et al. 2014).

Kylmyys hidastaa sideainereaktioita ja saattaa johtaa myös loppulujuuden alenemiseen. Ruohonen (2006) totesi diplomityössään, että huoneenlämmössä säilytettyjen, sementillä stabiloitujen koekappaleiden lujuudet olivat suuremmat kuin kylmähuoneessa säilytettyjen. Koekappaleiden puristuslujuudet likipitään kaksinkertaistuivat säilytyslämpötilan noustessa kuudesta $22\text{ }^{\circ}\text{C}$:een. Esimerkiksi kipsi, kuonat, tuhkat ja kalkki ovat hitaita sideaineita, joiden lujittumisreaktiot jatkuvat pitkään sideaineen sekoittamisen jälkeen. Sementti puolestaan on hydraulinen sideaine, joka lujittuu nopeammin. Sementin ja veden reaktiossa syntynyt lämpö edistää potsolaanireaktiota, ja siten vauhdittaa muun muassa kuonien lujittumista. (Forsman et al. 2014; Janz & Johansson, 2002). Kuvassa 7.4 on esitetty eri sideaineilla ja sideaineseoksilla stabiloidun saven lujittumista 20 ja $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötiloissa. Lujuus kasvaa selkeästi lämpötilan noustessa. Lämpötilan lisäksi muita stabilointiin vaikuttavia olosuhteita ovat esimerkiksi tulvat, jotka saattavat haitata työmaalle pääsyä ja stabilointityön tekemistä.



Kuva 7.4. Saven lujittuminen erilaisilla sideaineilla 20 ja 8 °C:n lämpötiloissa (Kukko 2000).

Esimerkkikohde Kotolahden ratapiha

Kotolahden stabilointikohteessa Kotkassa vuonna 2010 stabilointityötä tehtiin kovan pakkasen aikana, jolloin riski stabiloitavan kerroksen jäätymiselle oli suuri. Kovalla pakkasella mahdollista lumipeitettä ei tule poistaa liian aikaisin, koska lumi suojaa alla olevaa maakerrosta jäätymiseltä. Kotolahden stabilointia on esitetty kuvassa 7.5. (Forsman 2015).



Kuva 7.5. Massastabilointia Kotolahdessa talvella 2010 (Forsman 2015).

Esimerkkikohde Jätkäsaaren allasstabilointi vaihe II

Ruoppausmassojen vesipitoisuuden nouseminen saattaa aiheuttaa ikäviä yllätyksiä stabiloinnin yhteydessä. Jätkäsaaren ruoppausmassojen stabiloinnin vaiheessa II havaittiin, että ruoppausmassojen vesipitoisuus oli kasvanut näytteenoton ja stabiloinnin välillä. Laboratorionäytteet oli otettu ja kokeet tehty pian massojen ruoppauksen jälkeen, ja sideainereseptointi tätä vaihetta varten oli tehty laboratoriokokeiden perusteella. Ennen stabilointityötä ja sen aikana ruoppausmassan vesipitoisuus altaissa kuitenkin nousi. Vesipitoisuuden kasvua ei huomattu ajoissa, joten massan stabiloinnissa käytetty sementtimäärä oli riittämätön ensimmäisessä altaassa. (Forsman et al. 2015).

Esimerkkikohde Kulomäki

Myös lämmin sää ja kuivuus voivat aiheuttaa ongelmia massastabiloinnissa. Erityisesti ex situ stabiloinnissa, jossa massastabilointi suoritetaan erillisissä stabilointialtaissa, stabiloitava massa voi lämpimällä säällä kuivua liikaa. Kulomäen koerakenteessa keväällä ja kesällä 2009 oli pitkä kuiva ja lämmin jakso, jonka aikana osittain tai kokonaan täytetyt koestabilointialtaat pääsivät kuivumaan pahasti. Kuivumista edesauttoi myös hyvin läpäisevät, louheesta rakennetut stabilointialtaan reunapenkereet, joiden läpi vesi pääsi pois altaista. Stabilointialtaan työnaikaista kastelua on esitetty kuvassa 7.6. (Kuismin 2017).

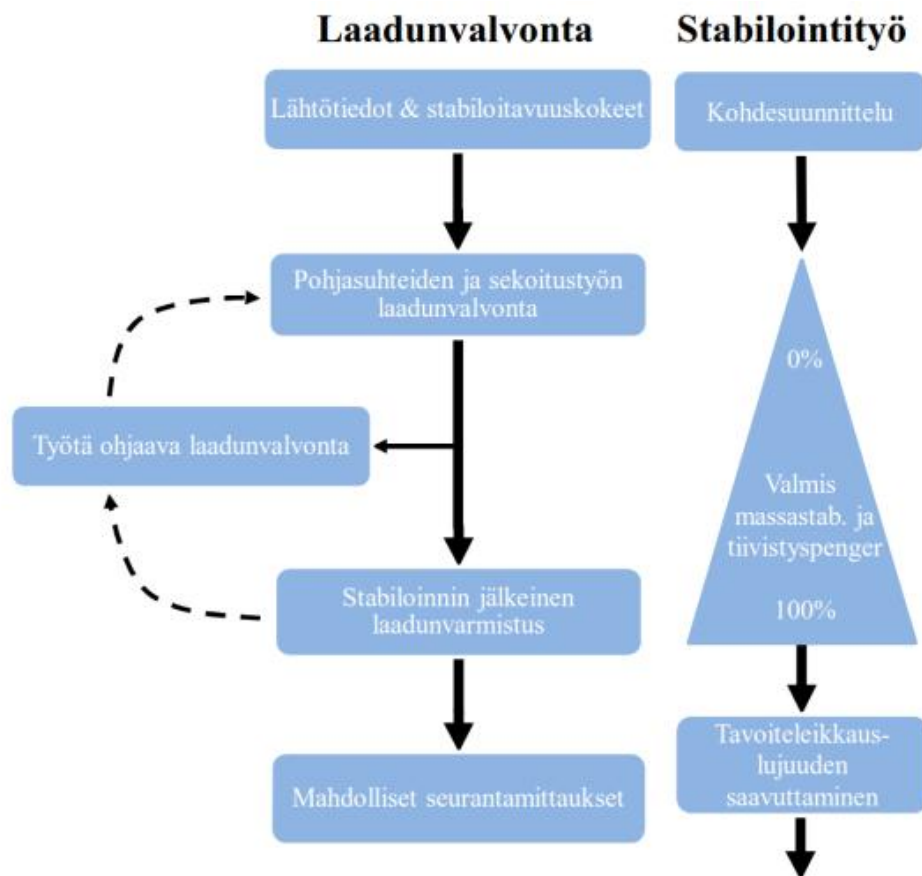


Kuva 7.6. Stabilointialtaan työnaikaista kastelua Kulomäen täyttömäen koerakenteessa (Vantaan kaupunki 2009).

8 Massastabiloinnin laadunvalvonta

8.1 Yleistä

Massastabiloinnin laadunvalvontamenetelmät ovat suurelta osin samoja menetelmiä, joita on aiemmin kehitetty pilaristabiloinnin laadunvalvontaa varten. Massastabiloinnin laadunvalvonta toteutetaan yleensä sekä työnaikaisena että lopputuloksen valvontana. Laadunvalvonnan tarkoituksena on varmistaa, että työ tehdään suunnitelmien mukaisesti ja että stabiloinnin lujuudenkehitys vastaa suunniteltua. Laadunvalvonnassa tarvitaan hyvää yhteistyötä rakennuttajan, suunnittelijan ja urakoitsijan välillä, mikä edellyttää tehtävien tiedostamista ja tehokasta tiedonkulkua eri osapuolten välillä. (Lahtinen & Parkkinen 1992). Massastabiloinnin laadunvalvontaprosessin eri vaiheet ja stabilointityön eteneminen on esitetty kuvassa 8.1.



Kuva 8.1. Massastabiloinnin laadunvalvontaprosessin eri vaiheet ja stabilointityön eteneminen (Melander 2017).

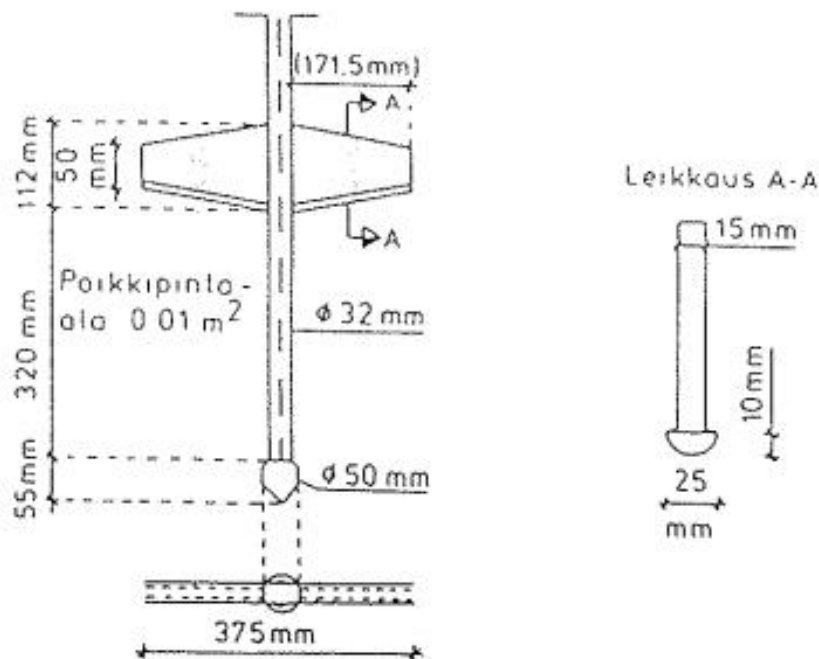
Luvuissa 8.2 ja 8.3 käsitellään stabilointityön aikaista ja jälkeistä laadunvalvontaa. Laadunvalvonnan ja -varmistuksen välinen raja on häilyvä, sillä laadunvarmistuskairauksia voidaan tarvittaessa käyttää stabilointityötä ohjaavana laadunvalvontana (Melander 2017).

Tärkein arviointiperuste massastabiloinnin laatua määritettäessä on valmiin stabiloinnin lujuus. Massastabiloidulle maalle asetetaan yleensä lujuustavoitteeksi 30...70 kPa. Epähomogeenisuus on hyvin tyypillistä massastabiloidulle maalle, minkä takia maan lujuuden arvioinnissa käytettäviä kairauksia tulisi tehdä riittävä määrä. (Junnila et. al. 2010).

8.2 Laadunvalvonta tutkimukset in situ

Stabiloidun massan lujuutta kuvaa parhaiten materiaalin leikkauslujuus, jonka määrittämiseksi käytetään suoraan stabiloidulle rakenteelle tehtyjä in situ -laadunvalvontakairauksia. Mahdollisia in situ -laadunvalvontakairauksia ovat pilari-, pilarisiipi- ja CPT- eli puristin-heijarikairaus. Näiden lisäksi in situ -laadunvalvontaan voidaan käyttää esimerkiksi ruuvi-levykuormituskoetta ja erilaisia geofysikaalisia menetelmiä.

Pilarikairaus on hyvin yleinen valmiin stabiloinnin laadunvalvontaan käytetty menetelmä (Liikennevirasto 2010). Pilarikairauksessa erityisesti pilaristabiloinnin lujuuden arvioimiseen suunniteltua kärkikappaletta painetaan stabiloituun maakerrokseen niin pitkään kuin se tunkeutuu. Menetelmä mahdollistaa kairan lyömisen tunkeutumisen loputtua, jolloin päästää lujien maakerrosten läpi. Pilarikairauksella saadaan mitattua jatkuva kairausvastus koko stabiloidun kerroksen syvyydeltä. (Lahtinen & Parkkinen 1992). Pilarikairan rakenne on esitetty kuvassa 8.2.



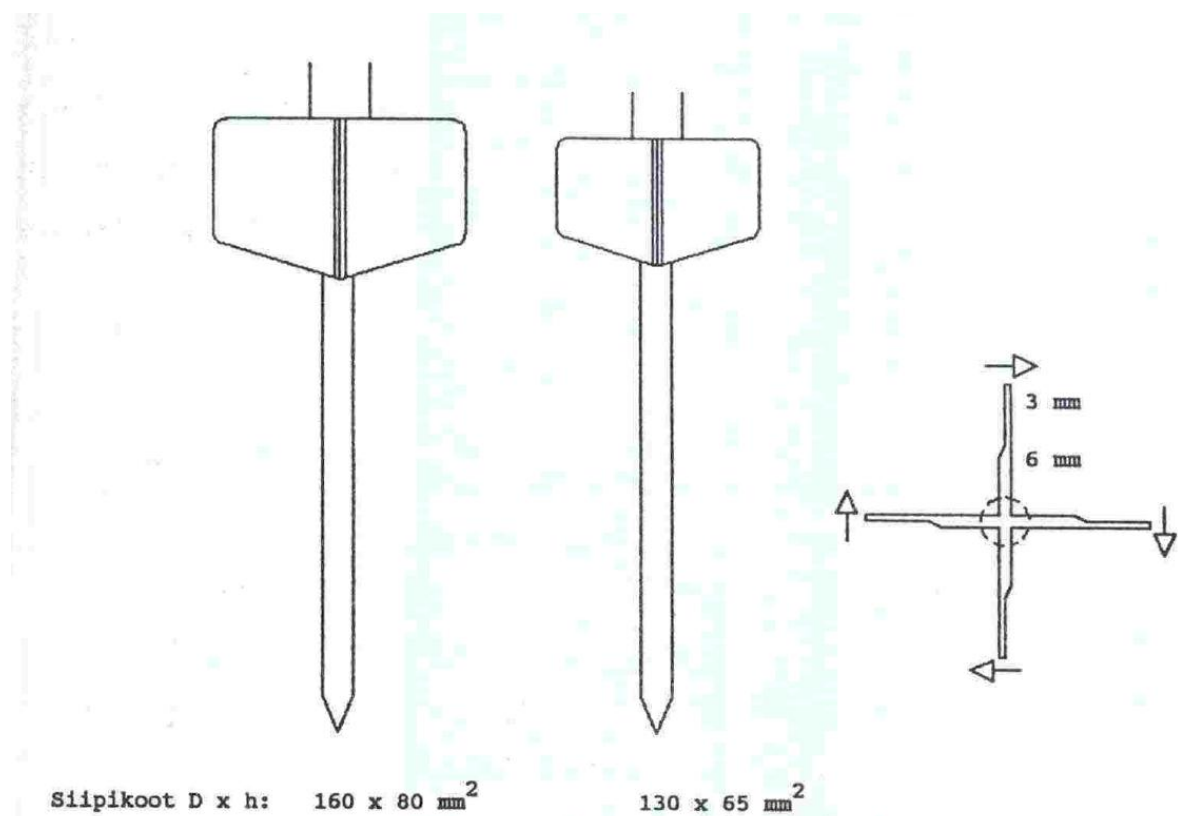
Kuva 8.2. Pilarikaira (Lahtinen & Parkkinen 1992).

Pilarikairalla saatu kärkivastus voidaan muuntaa maan likimääräiseksi leikkauslujuudeksi s_u käyttämällä kokemuseräistä kaavaa 8.1.

$$s_u = \frac{p - \sigma_0'}{N_c} \quad (8.1)$$

s_u on	likimääräinen leikkauslujuus
p	kairausvastus
σ_0'	maan tehokas pystysuora jännitys
N_c	kantavuuskerroin, joka saadaan koneellisesti määritettyä vertaamalla pilarikairaustuloksia siipikairauksella saatuihin todellisiin leikkauslujuuden arvoihin.

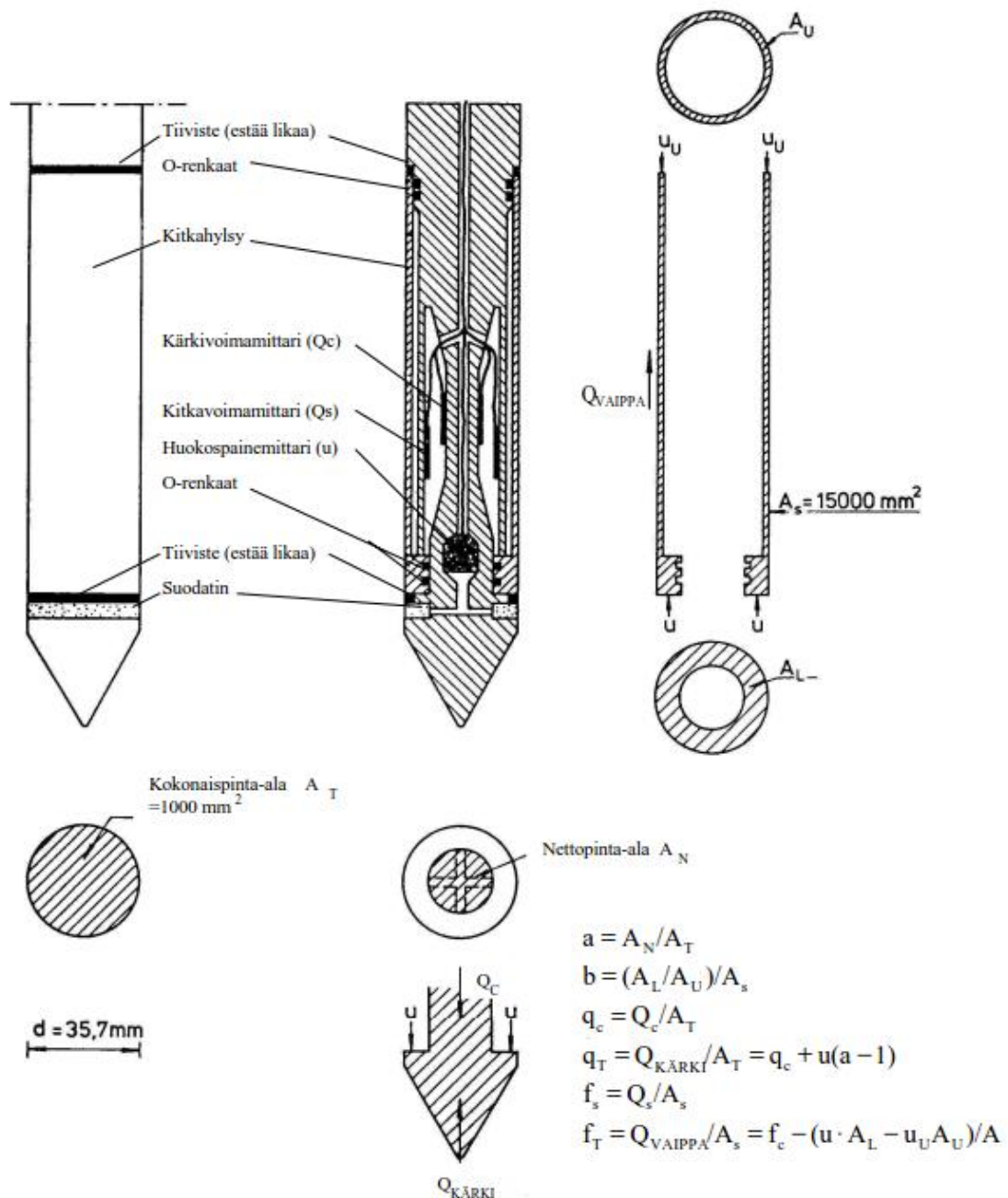
Pilarisiipikairaa käytetään stabiloinnin leikkauslujuuden määrittämiseksi tietyillä syvyyksillä. Kairauksen tuloksena saadaan suoraan pilarin leikkauslujuus, mikä onkin pilarisiipikairauksen etu pilarikairaukseen nähden. Epähomogeenisessa stabiloinnissa siipikairaustulokset saattavat olla hyvin vaihtelevia ja poiketa merkittävästi pilarikairan antamista tuloksista. (Lahtinen & Parkkinen 1992). Erikokoisia pilarisiipiä on esitetty kuvassa 8.3.



Kuva 8.3. Pilarisiipikairoja (Lahtinen & Parkkinen 1992).

Massastabiloinnin laadunvalvonnassa käytetään yleensä kustannustehokasta menetelmää, jossa sovelletaan sekä pilari- että pilarisiipikairausta. Alun perin pilaristabiloinnille kehitetyn yhdistelmämenetelmän on havaittu soveltuvan hyvin myös massastabiloinnin laadunvarmistamiseen. (Bergman 2012).

Puristin- eli CPTU-kairauksessa puristetaan maahan vakionopeudella (20 mm/s) kärkikartiota, jonka poikkipinta-ala on 1000 mm² ja kärkikulma 60°. Kairauksen aikana mitataan kärkivastus, vaippakitka, huokospaine sekä kairaussyvyys. Mitattavat parametrit rekisteröivät sähköisesti. Mittausväli on niin tiheä (n. 0,01...0,02 m), että tuloksena saavutetaan lähes jatkuvia mittauskäyriä. CPTU-kairan kärki muodostuu kärkikartiosta, suodattimesta, kitkahylsystä sekä kairan kärkikappaleen sisässä olevista mitta-antureista. (Törnqvist et. al. 2001). CPTU-kairan osat ja niiden sijainti on esitetty kuvassa 8.4.



Kuva 8.4. CPTU-kairan osat ja niiden sijainti kairassa (Törnqvist et. al. 2001).

Ruuvilevykuormituskokeessa käytetään laitetta, joka on periaatteeltaan levykuormituslaite, jossa kuormituslevy on muotoiltu ruuvilevyksi. Ruuvi voidaan kiertää haluttuun syvyyteen

ja koestaa stabilointi eri syvyyksillä. Ruuvilevykuormituskokeen tuloksista voidaan määrittää painumaparametrit, kuten murtojännitys σ_u , myötöjännitys σ_r , kokoonpuristuma s ja kimmomoduuli E_p . Ruuvilevykuormituskoe on hidas ja kallis menetelmä, jonka tulosten analysoinnissa on usein vaikeuksia. Koe on kuitenkin ainoa menetelmä, jolla stabiloidun massan kimmomoduuli voidaan määrittää in situ -tilanteessa. (Lahtinen & Parkkinen 1992). Taulukossa 8.1 on esitetty eri laadunvalvontakairausmenetelmien etuja ja puutteita.

Taulukko 8.1. In situ -tutkimusmenetelmät, niillä saatavat tulokset sekä menetelmien edut ja puutteet (Lahtinen & Parkkinen 1992, muokattu).

Menetelmä	Mitattavat ominaisuudet	Menetelmän edut	Menetelmän puutteet
Pilarikaira	- puristuslujuus - leikkauslujuus (välillisesti siipikairausten perusteella)	nopea, jatkuva	ohjautuminen ulos pilareista, vaippavastus mukana lukemassa
CPTU-kaira	- puristuslujuus - vaippakitka - huokosvedenpaine -> leikkauslujuus	mitataan kärkivastus, nopea, jatkuva, sopii lujittuneelle sementti- ja kalkkisementtistabiloinnille	ohjautuminen ulos pilareista, mittaa puristuslujuuden pieneltä pilarialalta, ei voida lyödä alas
Pilarisiipikaira	- leikkauslujuus	leikkauslujuus saadaan mitattua suoraan	epäjatkuvuus tulos, hidas, kairan ulostunkeutuminen
Ruuvilevykoe	- painuma - myötölujuus - murtolujuus -> kimmomoduuli	ainoa menetelmä in situ -kimmomoduulin määrittämiseksi, suora myötölujuuden määrittäminen	erittäin hidas ja kallis, tulosten analysoinnissa usein vaikeuksia

8.3 Laboratoriokokeet stabiloidulle rakenteelle

Massastabiloidusta rakenteesta voidaan ottaa näytekappaleita, joiden avulla valmistaa stabilointia voidaan tutkia laboratoriossa. Tutkimusten avulla saadaan tietoa stabiloidun massan lujuudesta, kokoonpuristuvuusominaisuuksista sekä sideainemäärästä ja -jakautumasta (Lahtinen & Parkkinen 1992). Näytteenottoa suositellaan käytettävän vain muita laadunvalvontamenetelmiä tukevana menetelmänä (Liikennevirasto 2010).

Valmiille näytteille voidaan laboratoriossa tehdä laadunvalvontatutkimuksina puristuslujuustutkimuksia, homogeenisuuden mittauksia sideainemääriä analysoimalla, vesipitoisuusmäärittäyksiä, pH-mittauksia ja pilaantuneiden maiden osalta myös liukoisuustutkimuksia. Lujuustutkimukset suoritetaan puristuskokeilla, joiden tulosten perusteella voidaan arvioida stabiloidun massan lujittuneisuutta. Sideainemäärityksellä voidaan tarkastaa toteutunut sideainemäärä. (Forsman et al. 2014).

Näytteenotto valmiista massastabiloidusta rakenteesta on usein haastavaa, ja ehjän näytteen ottaminen onnistuu varsin vaihtelevasti. Mikäli stabiloidusta kerroksesta saadaan otettua jatkuva näyte, voidaan lujuuden ja sen vaihtelun arvioinnissa käyttää penetrometrimittauksia. Sideainemäärän vaihtelun mittauksiin voidaan käyttää Nitonia. Jatkuva näyte kannattaa aina valokuvata ja tehdä näytteen tasalaatuisuudesta ja laatuvarhaisuudesta silmämääräinen arvio. Näytteiden puristuslujuutta on suositeltavaa testata kolmiakselialikokeiden avulla,

sillä yksiaksiaalikokeella saadaan liian alhaisia puristuslujuuden arvoja, jos näyte on vähänkin häiriintynyt tai murtunut. (Forsman et al. 2014).

Niton-alkuaineanalysaattorilla voidaan kentällä arvioida stabiloidun massan homogeenisuutta ja sideaineen määrää mittaamalla stabiloidun maan kalsiumpitoisuutta, ja vertaamalla mittaustuloksia kyseisille runkoaineelle ja sideaineelle tehtyihin kalibrointituloksiin. (Forsman et al. 2014).

Penetrometrillä voidaan puolestaan saada suuntaa-antavaa tietoa esimerkiksi maa-aineksen lujuudesta. Penetrometrissä on tangon päässä piikkimäinen, kartion muotoinen kärki, jota painetaan tasaisella voimalla tutkittavaan materiaaliin joko materiaalin murtumiseen tai penetrometrin osoittamaan merkkiin asti. Laitteen asteikko osoittaa piikin työntämisen aiheuttaman vastuksen ja sitä kautta materiaalin lujuuden. (Forsman et al. 2014). Niton-alkuaineanalysaattori on esitetty kuvassa 8.5 ja erilaisia penetrometrejä kuvassa 8.6.



Kuva 8.5. Niton-alkuaineanalysaattori (Forsman et al. 2014).



Kuva 8.6. Erilaisia penetrometrejä (Forsman et al. 2014).

8.4 Valvontakairausten haasteita

Laadunvalvontakairausten suorittamiseen liittyy useita haasteita, joista voi aiheutua merkittävää virhettä kairaustulokseen. Eräs suurimmista ongelmista on kairakärkeen ja kairaustankoon kohdistuva kitkavastus. CPT-kairauksessa, jossa kairakärki ja -tangot ovat saman paksuisia, on pyörittämättömiin tankoihin kohdistuva kitkavastus samansuuruinen kuin kärkivastus jo muutaman metrin syvyydellä (Törnqvist & Juvankoski 2003). Kitkavastus on arvion mukaan merkittävä myös pilarikairauksessa kärjen muotoilusta huolimatta. Vinoon suuntautuneiden kairausten tankoon kohdistuva kitkavastus on oletettavasti vielä suoraa kairausta suurempi. Suuremman kitkavastuksen arvioidaan kohdistuvan tankoon myös kairauksissa, joissa kärjen arvellaan pujottelevan stabiloidussa kerroksessa olevia pehmeitä kohtia seuraten. Kovassa stabiloinnissa kairakärki aiheuttaa stabilointiin hauraita murtumia. Tällöin stabiloidun kerroksen ja kairakärjen sekä -tankojen väliin jää ilmaa ja murenevaa stabiloitua massaa, mikä aiheuttaa virhettä kairaustuloksessa. (Melander 2017).

Esimerkkikohde Jätkäsaaren koemeluvalli

Pehmeässä stabiloinnissa stabiloitu massa takertuu kairakärkeen ja tankoihin. Massan takertumisen arvioidaan kasvattavan kairauksen aikaista kairaus- ja kitkapinta-alaa, ja siten kasvattavan vaadittavaa puristusvoimaa. (Melander 2017). Pilarikairan kairakärkeen ja -tankoon takertunutta pehmeää massaa Jätkäsaaren koemeluvallin tutkimuskairauksissa on esitetty kuvassa 8.7.



Kuva 8.7. Jätkäsaaren koemeluvallin tutkimuskairauksissa käytetty pilarikairan kairakärki ja -tanko, joihin on takertunut pehmeää stabiloitua massaa (Melander 2017).

Esimerkkikohteet Kose-Mäo ja Veittostensuo

Massastabiloinnin laadunvalvontakairaukset tulee aina suorittaa siten, että kairakärki asetetaan esiinkaivetun massastabiloinnin pinnalle, eli stabiloinnin päällä oleva tiivistys- tai

esikuormituspengeri tulee poistaa tarvittavassa laajuudessa. Penkereeseen voidaan kaivaa tätä varten kuoppa, ja mieluummin itse kairauksetkin tulisi suorittaa kuopassa. Työteknisistä syistä penkereeseen kaivettu kuoppa kuitenkin usein täytetään ennen kairausten suorittamista, jolloin jyrkkäreunaiseen kuoppaan voidaan asettaa useita kairakärkiä samanaikaisesti, eikä kuopan pohjalle tarvitse jättää tilaa kairausvaunulle tai kuopan reunoja loiventaa turvallista työskentelyä varten. Tämä menettely säästää aikaa, vähentää liikuteltavan pengermassan määrää ja lisää yleisesti käytettävissä olevaa työskentelytilaa. Kairaustulosten tarkkuus saattaa kuitenkin kärsiä kairatankoon täyttömateriaalista mahdollisesti aiheutuvasta suuremmasta kitkavastuksesta johtuen. Kitkavastuksen suuruus riippuu pengermateriaalista, penkereen paksuudesta ja tiiveydestä. Monesti myös stabiloinnin yläpinnalle asetetut kairakärjet kallistuvat sivulle kuoppaa täytettäessä, jolloin kairaus saattaa lähteä etenemään vinoon, on hankalampi suorittaa, ja tulosten luotettavuus kärsii. Kairakärjen kallistuminen olisi mahdollista välttää käyttämällä tarkoitusta varten kehitettävillä ”tukikoolingeilla”, joilla kairakärjet ja -tangot voitaisiin tukea ennen kuopan täyttämistä. (Melandar 2017). Kairakärkiä esiinkaivetun massastabiloinnin pinnalla Kose-Mäen ja Veittostensuon kohteissa on esitetty kuvassa 8.8.



Kuva 8.8. Kairakärkiä esiinkaivetun massastabiloinnin pinnalla Kose-Mäen (vasemmalla) ja Veittostensuon (oikealla) stabilointikohteissa. Kärkien asettamisen jälkeen kuopat täytettiin pengermateriaalilla ennen kairausten suorittamista. (Piispanen, 6.11.2015 ja 17.8.2016).

9 Johtopäätökset

Stabilointityön onnistuminen on aina monen tekijän summa. Tärkeimpiä laatuun ja toteuttavuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat stabiloitava runkoaine ja sen ominaisuudet, stabiloinnissa käytettävät side- ja mahdolliset lisäaineet, stabiloinnin huolellinen suunnittelu ja mitoitus, sekä työnaikaiset tekijät. Stabilointityön aikaisista tekijöistä tärkeimmäksi nousi tutkimusten valossa sekoitustyöhön käytetty aika, jolla on suuri vaikutus stabiloidun massan homogeenisuuteen ja sitä kautta tasaiseen lujuteen.

Teollisuuden sivutuotteita massastabiloinnin side- ja lisäaineina on jo tutkittu paljon, mutta lisätutkimusta tarvitaan. Ongelmaksi sivutuotteiden ja jätteiden käytössä saattaa muodostua mahdollisesti vaadittava ympäristölupa, joka voi hidastaa tai estää sivutuotteiden kokeilemista massastabilointikohteissa.

Yksi tärkeimmistä stabiloinnin onnistumiseen vaikuttavista tekijöistä on riittävien lähtötietojen saaminen kohteesta. Näitä lähtötietoja ovat pohjatutkimukset ja maanäytteet, sekä niille tehtävät luokitus- ja stabiloitavuuskokeet. Stabiloitavuuskokeiden avulla voidaan verrattain edullisesti löytää kohteeseen paras mahdollinen sideainereseptointi. Laboratoriossa tehtävien stabiloitavuuskokeiden suorittamisessa pitää noudattaa erityistä tarkkuutta sekä koekappaleiden valmistamisen, että niille tehtävien kokeiden suhteen. Kokeet tulee tehdä oikeaa työtapaa käyttäen. Lisäksi tulee valita kullekin näytteelle ja kohteelle parhaiten soveltuvat koemenetelmät.

Lisätutkimuksia tarvitaan myös stabiloinnin kenttä- ja laboratoriolujuuden erojen osalta. Asiasta on paljon kokemuseräistä tietoa, mutta tarkempia tutkimuksia varsin vähän. Läheteiden perusteella näyttää siltä, että useimmissa kohteissa laboratoriolujuus on ollut huomattavasti kenttälujuutta suurempi. Tämä selittyy erityisesti laboratoriossa vallitsevilla vakioituilla olosuhteilla, jotka voivat erota merkittävästi kenttäolosuhteista. Kuitenkin joissain tapauksissa kentällä on saavutettu massastabiloinnille suurempi lujuus esimerkiksi stabiloinnin paremman tiivistymisen ansiosta.

Suuri massastabiloinnin laatuun liittyvä haaste on työnaikainen laadunvalvonta. Monet menetelmät soveltuvat valmiin rakenteen laadunvarmistukseen, mutta esimerkiksi sideaineen sekoitustyön ja stabiloitavan kerroksen homogeenisuuden valvominen työn aikana on vaikeaa. Maahan syötettävän sideaineen määrä laskennallista maa-aineksen määrää kohden voidaan todentaa, kuten myös sekoitustyöhön käytetty aika, mutta itse sekoitustyön riittävyyttä ja kattavuutta on haastavaa todentaa. Yksi ratkaisu tähän voisi löytyä koneohjauksesta. Sekoitinkärkeen tai koneen puomiin asennettavien paikannusanturien avulla voitaisiin saada reaaliaikaista tietoa sekoitinkärjen liikkumisesta maaperässä. Tätä tietoa voitaisiin käyttää myös sekoitinkärjen ohjaamiseen sekä stabilointityön dokumentoimiseen. Samalla voitaisiin mahdollisesti ehkäistä paikallisten, lujittumattomien heikkousvyöhykkeiden syntymistä, kun voitaisiin varmistaa, että sekoitustyö on tehty koko kerroksen laajuudelta. Myös stabiloidun massan pH-arvon määrittäminen voitaisiin kenties käyttää massassa olevan sideainemäärän toteamiseksi jo sekoitustyön aikana. Sekoitustyön työnaikainen laadunvarmistus voisi auttaa myös sideainemäärän ja sekoitustyöhön käytetyn ajan optimimisessa, ja sitä kautta pienentää massastabiloinnin kustannuksia.

Lähdeluettelo

ALLU Finland Oy. 2007. Mass stabilisation manual.
Saatavissa: <http://www.stamix.net/mass-stabilisation>

Bergman, N. 2012. Characterization of strength variability for reliability-based design of lime-cement columns. Lisensiaattityö. The Royal Institute of Technology: Department of Civil and Architectural Engineering, Tukholma, Ruotsi. 91 s. ISSN 1650-951X

Carlsten, P. & Olsson, M. 2004. Masstabilisering av torv på riksväg 44. NGM 2004, Nordiskt geoteknikermöte, 14, Ystad, Maj, 2004. Proceedings, vol. 1.

Chew, S. H., Kamruzzaman, A. H. M., Lee & F. H. 2004. Physicochemical and Engineering Behaviour of Cement Treated Clays. Journal of Geotechnical and Environmental Engineering. Vol. 130 (7), pp. 696-706.

Dettenborn, T. & Forsman, J. 2015 Mass stabilization tests – comparison between Kelprojecktas and Ramboll Finland Oy laboratory test results. Ramboll Finland Oy:n projektimateriaali.

EuroSoilStab. 2002. Development of design and construction methods to stabilise soft organic soils. Design Guide Soft Soil Stabilisation. CT97-0351. Industrial & Materials Technologies Programme (Brite-EuRam III). Project No. BE 96-3177. European Commission. 94 p. [Viitattu 23.10.2017]. Saatavissa: <http://spsi-sro.ru/files/stab.pdf>

Forsman, J., Hakari, M., Jyrävä, H., Ritsberg, K. & Skepast, P. 2009. Mass stabilization of R263 highway section Kose - Mäo in Estonia. XXVII International Baltic Road Conference Riga, Latvia. 10 p.

Forsman, J., Jyrävä, H., Lahtinen, P., Niemelin, T. & Hytönen, I. 2014. Massastabilointikäsikirja. [Verkojulkaisu] 62 s. [Viitattu 23.10.2017]. Saatavissa: http://www.uusiomaarakentaminen.fi/sites/default/files/Massastabilointik%C3%A4sikirja%20YLEISVERSIO%20-%202014_06_24.pdf

Forsman, J. 2015. Mass stabilization in infrastructure and environmental construction, Mass stabilization conference, Lahti

Forsman, J et al. 2015. Three mass stabilization phases in the West Harbour of Helsinki, Finland – geotechnical and environmental properties of mass stabilized dredged sediments as construction material, Deep mixing conference, San Francisco ABSOILS, (2015), Final report on the pilot applications and quality control of the absoils project. [Viitattu 25.10.2017] Saatavissa: http://projektit.ramboll.fi/life/absoils/matsku/absoils_final_report_on_pilots_and_quality_control.pdf

Forsman, J. 2017. Diplomi-insinööri, Toimialapäällikkö, Ramboll Finland Oy, Espoo. Sähköpostikeskustelu 7.11.2017

Hainari, S. 2016. Massastabiloinnin vaikutus maan indeksi- ja geoteknisiin ominaisuuksiin. Diplomityö Tampere: Tampereen Teknillinen Yliopisto. 121 s.

Hautalahti, P., Halkola, H. & Puumalainen, N. 2007. Kivikon teollisuusalueen stabiloinnin koerakentaminen. Helsinki: Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto. 105 s. Geotekninen osasto julkaisu 92. ISBN 978-952-223-008-9.

Saatavissa: <http://www.hel.fi/static/kv/Geo/Julkaisut/julkaisu92.pdf>

Janz, M. & Johansson, S-E. 2002. The Function of Different Binding Agents in Deep Stabilization. Linköping, Sweden: Swedish Deep Stabilization Research Center. 52 s. Raport 9 English Translation. Saatavissa:

<http://www.swedgeo.se/globalassets/publikationer/svensk-djupstabilisering/sd-r9e.pdf>

Jelusic, N. 2000. Masstabilisering. Lund: Lunds Universitet, Lunds Tekniska Högskola, Avdelning for Geoteknik. ISBN 91-630-8364-7, ISRN LUTVDG/TVGT-1007_SE, Saatavissa: <http://www.swedgeo.se/globalassets/publikationer/svensk-djupstabilisering/sd-r5.pdf>

Jelusic, N. 2002. Mass stabilization, Stability and settlement in mass stabilized peat. Väitöstyö. Lund University, Lund Institute of Technology, Department of Soil Mechanics and Foundation Engineering. 168 s.

Junnila, A. & Tuhola, M. 1999. Syvästabilointi Tielaitoksen kohteissa. Osa 1: Toteutuneet kohteet. Oy Edita Ab, Helsinki. 39 s. ISBN 951-726-477-1.

Kitazume, M. & Terashi, M. 2013. The Deep Mixing Method. Leiden. CRC Press / Balkema. 410 p.

Koivosto, K., Forsman, J. & Leppänen, M. 2004. Column and Mass Stabilisation of the Yard of IKEA in Vantaa, Finland. NMG 2004, Nordiskt geoteknikermöte, 14, Ystad, Maj, 2004. Proceedings, vol 1. 12 s.

Korhonen, K-H. 1967. Geotekniset laboratoriotutkimusohjeet, ödometrikoe. Espoo: VTT. 40 s.

Kuismin, A. 2017. Pienillä sementtimäärillä stabiloidun saven käyttö täyttömäen tukipenkereissä: Kulomäen koerakenne. Erikoistyö. Aalto-yliopisto, Insinööritieteiden korkeakoulu.

Kukko, H. 2000. Stabilization of Clay with Inorganic By-Products. Journal of Materials in Civil Engineering. [Verkkolehti] Vol. 12:4. s. 307-309.

Lahtinen, P. 1992. Syvästabilointiohje STO-91. Rakennustieto. 53 s. ISBN 951-68-3339-0

Lahtinen, P. & Parkkinen, E. 1992. Syvästabiloinnin laadunvalvontaohje. Valtion painatuskeskus, Helsinki. 49 s. ISBN 951-47-6510-9.

Lahtinen, P. & Niutanen, V. 2009. Development of In-Situ Mass Stabilization Technique in Finland. Proceedings of the 2009 Okinawa Symposium, International Symposium on Deep Mixing & Admixing Stabilization, Okinawa, Japan, May 19-21, 2009. [verkkojulkaisu]. 6 s. Saatavissa: <http://projektit.ramboll.fi/life/stable/images/Okinawa-2009.pdf>

Larsson, R. Djupstabilisering med bindemedelsstabiliserade pelare och masstabilisering – En vägledning. 2006. Linköping. Svensk Djupstabilisering. 381 s. Rapport 17. Saatavissa: <http://www.swedgeo.se/globalassets/publikationer/svensk-djupstabilisering/sd-r17.pdf>

Liikennevirasto. 2010. Syvästabiloinnin suunnitteluohje. Tien pohjarakenteiden suunnitteluohjeet. Helsinki, Liikennevirasto. Liikenneviraston ohjeita 11/2010. 79 s. Saatavissa: http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/lo_2010-11_syvastabiloinnin_suunnittelu_web.pdf

Melander, M. 2017. Massastabiloinnin laadunvarmistuskairaukset. Diplomityö. Aalto-yliopisto, Insinööritieteiden korkeakoulu. 93 s.

Mäkelä, E., Wahlström, M., Pihlajaniemi, M., Mroueh, U-M., Keppo, M. & Rämö, P. 1998. Kivihiilivoimaloiden rikinpoistotuotteet ja lentotuhka maarakentamisessa: jatkotutkimus. Espoo: VTT. 61 s. VTT Tiedotteita 1952

Mäkelä, H. & Höynälä, H. 2000. Sivutuotteet ja uusiomateriaalit maarakenteissa: materiaalit ja käyttökohteet. Helsinki: Tekes. 97 s. Teknologia katsaus 91/2000.

Mäkelä, H., Höynälä, H., Halkola, H. & Kettunen, A. 2000. Viikin savikatu. Helsinki: Helsingin kaupunki, kiinteistövirasto, geotekninen osasto. 61 s. GEO 81/2000

Piispanen, P. 2017. Massastabiloinnin pitkäaikaistoimivuus. Diplomityö. Aalto-yliopisto, Insinööritieteiden korkeakoulu. 92 s.

Ramboll Finland Oy. 2002. IKEA Vantaa, Pihan korjaus, eteläosan P-alue. Ramboll Finland Oy:n projektimateriaali.

Ramboll Finland Oy. 2007. Kotolahden ratapihan stabiloitavuusselvitys, täydentävät laboratoriotutkimukset sekä koestabilointiin liittyvä laboratoriotestaus. Tulosraportti. Ramboll Finland Oy.

Ramboll Finland Oy. 2009. Pitkäjärventien ja Riihiniityntien liittymän rakennussuunnitelma, Työkohtainen työselostus. Ramboll Finland Oy:n projektimateriaali.

Ramboll Finland Oy. 2012. Jätkäsaari II, Tuhkastabilointikokeilun toteutus. Raportti. Ramboll Finland Oy:n projektimateriaali.

Ramboll Finland Oy. 2014. Honkasuon massastabilointi, stabiloitavuustutkimukset. Tekninen tulosraportti. Ramboll Finland Oy:n projektimateriaali.

Rantamäki, M., Jääskeläinen, R. & Tammirinne, M. 2004. Geotekniikka. 20 laitos. Helsinki: Otatieto. ISBN 951-672-257-1.

Ravaska, O., Palolahti, A. & Lojander, M. 2003. Natural Clay Barriers in Finland. Teoksessa: XIII Eur. Conf. of Soil Mechanics and Geotech. Eng. Prague 25.–28.8.2003. Prague. s. 547-552.

Rekonen, R. 1993. Saven ominaisuuksien parantaminen massastabiloinnilla. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, Rakennus- ja ympäristötekniikan osasto. Espoo. 76 s.

Ruohonen, E. 2006. Ylijäämäsavien käyttö rakennustekniikassa. Diplomityö. Espoo: Teknillinen korkeakoulu.

Suomen geoteknillinen yhdistys. 1985. GLO-85 Geotekniset laboratorio-ohjeet 1. Luokituskokeet. Espoo: Rakentajain Kustannus Oy. 107 s.

Tielaitos. 1996. Pilari- ja massastabiloinnin tuotantotekniikka. Tielaitoksen selvityksiä 39/1996. Helsinki. Edita. ISBN 951-726-241-8. 32 s.

Törnqvist, J., Juvankoski, M. & Tammirinne, M. 2001. CPTU-kairaus. Menetelmäkuvaus. TPPT 11. VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. 55 s.

Vantaan Kaupunki. 2009. Kulomäen täyttömäki, Saven massastabilointi sementillä. Koe-rakentamisen loppuraportti.

Viljas, P. 1996. Kalkki-sulfaattiaktivoitu masuunikuonajauhe stabiloinnin sideaineena. Licensiaatintyö. Oulun yliopisto, rakentamistekniikan osasto. 67 s.

Virtanen, P., Hämäläinen, J. & Laaksonen, R. 2006. Huokoisen materiaalin vedenläpäisevyyden mittaaminen joustavaseinäisellä vedenläpäisevyyslaitteistolla muuttuvapainekokeena tai vakio painekokeena. S.I.: Tieliikelaitos, Suomen ympäristökeskus ja VTT.

Åhnberg, H. 2006. Strength of stabilised soils – A Laboratory Study on Clays and Organic Soils Stabilised with Different Types of Binder. Doctoral Thesis. Lund University, Department of Construction Sciences. Lund. 80 s. + papers I-VII.
Saataavissa: <http://www.swedgeo.se/globalassets/publikationer/rapporter/pdf/sgi-r72.pdf>

Åhnberg, H., Johansson, S-E., Retelius, A., Ljungkrantz, C., Holmqvist, L., Holm, G. 1995. Cement och kalk för djupstabilisering av jord: En kemisk – fysikalisk studie av stabiliseringseffekter. Linköping, Sverige: Statens geotekniska institut. Rapport No 48.
Saataavissa: <http://www.swedgeo.se/globalassets/publikationer/rapporter/pdf/sgi-r48.pdf>

Liiteluettelo

- Liite 1. Kotolahden ratapihan kohdekortti
- Liite 2. Ikea Vantaa kohdetietoja
- Liite 3. Kose-Mäo kohdekortti
- Liite 4. Kulomäen täyttömäen koerakenne
- Liite 5. Jätkäsaaren kohdekortti

Liite 1. Kotolahden ratapihan kohdekortti

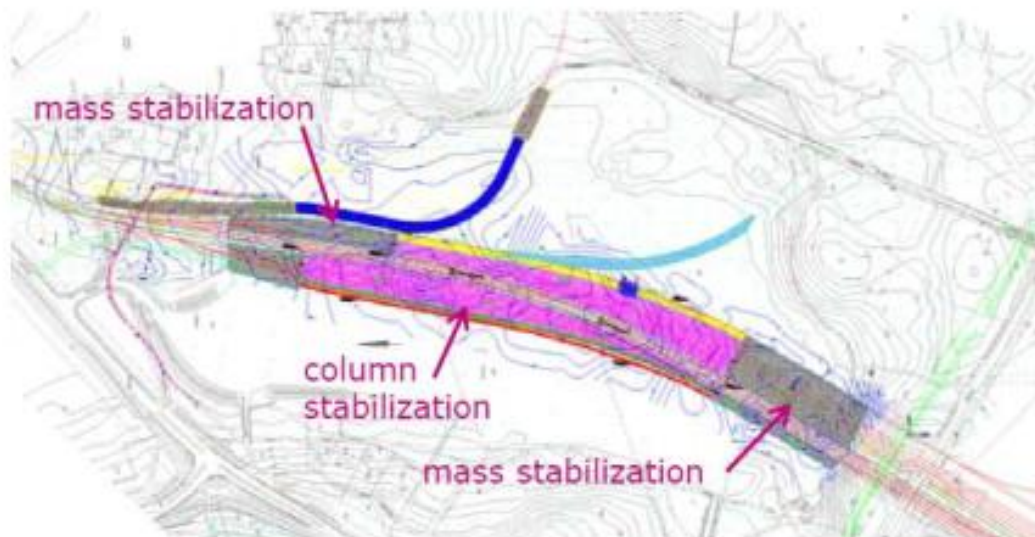
CASE KOTOLAHTI	
KOTOLAHTI Kotolahti, Kotka, Finland Railway yard	Key words: Railway yard, mass stabilization, column stabilization
General information	In Kotolahti a new railway yard was built next to old railway track. The subgrade improvement was done with column stabilization and some parts of the yard were mass stabilized.
Advantages of stabilization	Column stabilization offered a cost effective alternative for traditional pile slab. Mass stabilization enabled avoiding of mass exchange of soft soils at the project area. Large and difficult landfilling of soft surplus soils was avoided with mass stabilization of soft soils.
Project timetable	2009-2010
Volumes and dimensions	Mass stabilization 20 000 m ³ , column stabilization 190 000 m
Geology and stabilized material	Clay, gyttja, peat
Target strength of the stabilized material	Target shear strength 150 kPa in column stabilization and ≈50 kPa in mass stabilization.
Binder(s)	Mass stabilization: the amount of cement is not public (contractors own design), Column stabilization: lime and cement (30:70), binder amounts 120-160 kg/m ³ . In mass stabilization only cement.
Laboratory and field tests	Supplementary geotechnical tests in the laboratory and compressive strength tests for different binder materials. Quality control soundings of deep stabilized layer.
Other	Woven high strength georeinforcement was installed over columns as a basal reinforcement to move the embankment loads to columns with large c/c-spacing.
Long-term follow-up and lessons learned	Old railway track was constructed on mass replacement and in the construction of mass replacement some boulders were moved beside the replacement area. Those boulders were sunk to soft soil causing some problems to deep stabilization beside the railway track.
Sources	Forsman, J.,(2015), <i>Mass stabilization in infrastructure and environmental construction</i> , Mass stabilization conference, Lahti
Stabilization contractor	Mass stabilization N&N Oy and column stabilization YIT Oy



CASE KOTOLAHTI



Mass and column stabilization in Kotolahti Railway yard in 2009



Mass and column stabilization areas in Kotolahti railway yard (up) and cross section of mass stabilized area beside old railway track (down).



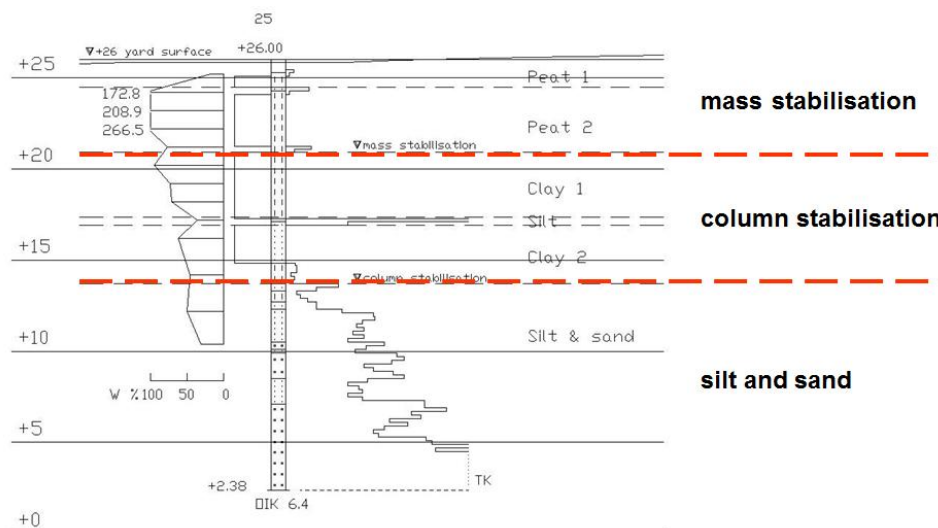
Liite 2. IKEA Vantaa, kohdetietoja



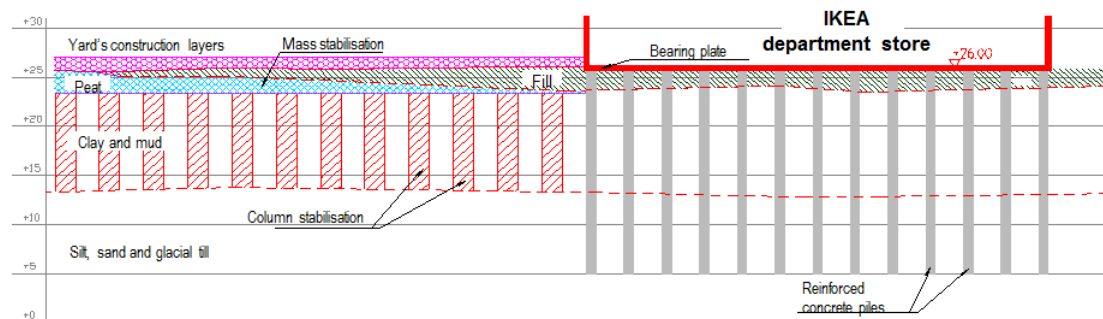
IKEA, Vantaa

Built in 2002-2003	
Gross volume of the building	266 000 m ³
Gross area	29 000 m ²
Parking area under the building	15 000 m ²

Location of IKEA store in Vantaa

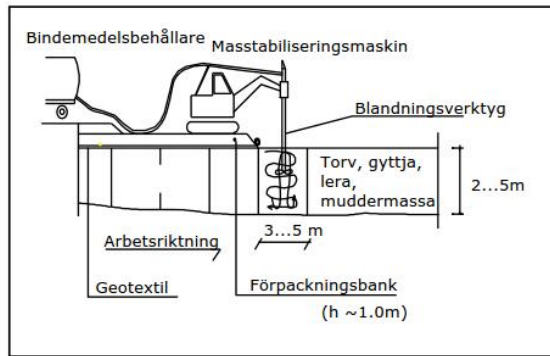


Soil conditions in the area

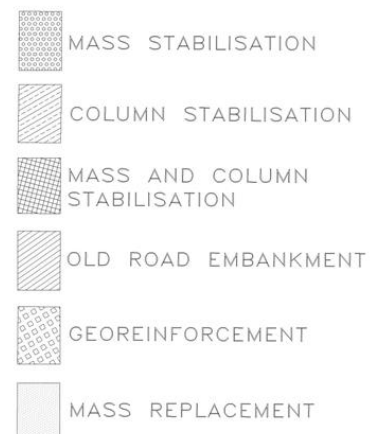
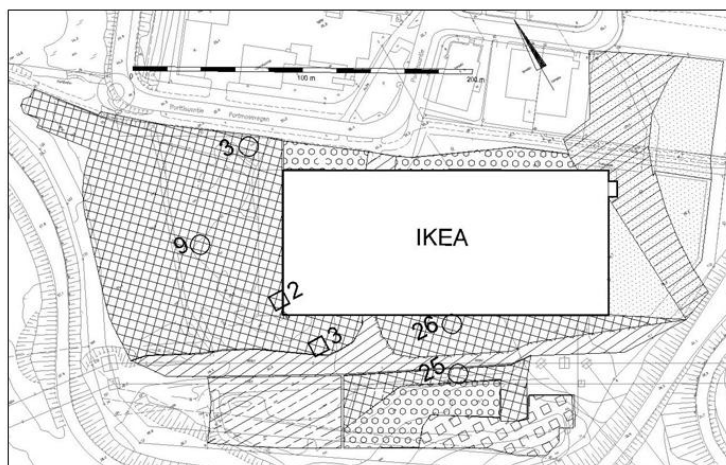


Volumes:

Percussion piles	31 000 m
Column stabilisation	110 000 m
Mass stabilisation	65 000 m ³



- Used binder: cement, 100 kg/m³
- Dimensioning shear strength 40 kPa (30 days)



Site map and ground reinforcement area

Research point	Embankment height	Depth of mass stabilation	Column length	Column c/c	Column diameter
3	1.7 m	2.5 m	9.0 m	1.2 m	600 mm
9	1.5 m	2.7 m	6.4 m	1.2 m	600 mm
25	0.8 m	4.5 m	8.7 m	1.3 m	600 mm
26	0.8 m	4.2 m	8.3 m	1.1 m	600 mm

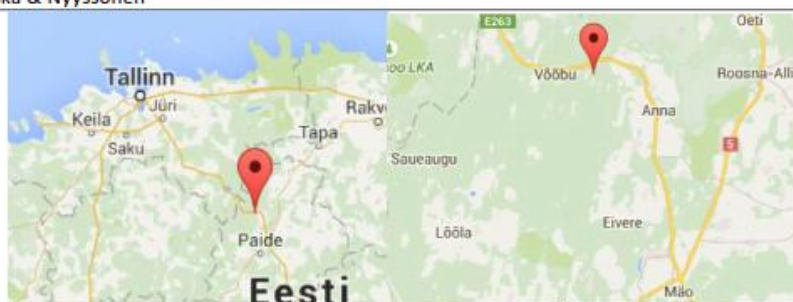
Geometry of column and mass stabilization

Liite 3. Kose-Mäo kohdekortti

Kose-Mäo
Järva, Estonia
Peat mass stabilisation
test field

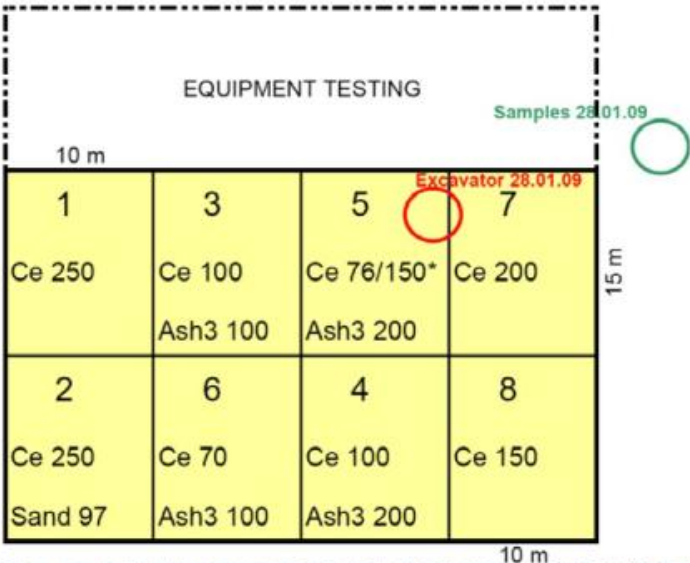
Key words:
Mass stabilization, Test field,
Road embankment, Peat
Cement, Shale ash

General information	<p>The E263 highway between Tallinn and Tartu in Estonia is designed to be built partly on a soft soil area in road section between Kose – Mäo (≈41 km). Soft soil area (mainly peat) was preliminary designed to be mass stabilised. The mass stabilisation test field was built to find the most potential way to carry out the mass stabilisation with different binders in practice in real circumstances. To find the best binder, binder's reliability, effectivity and cost were optimised. Kose-Mäo mass stabilisation test field was the first mass stabilisation project in Estonia.</p> <p>Several soil samples for laboratory tests were taken in summer 2007 and winter 2009. The mass stabilisation test field was built in 2009. The test field was divided into 8 separate areas which were stabilised each with different binder type or amount.</p>
Advantages of stabilization	Mass stabilisation is a cost-efficient way to improve peat's geotechnical properties, which reduces settlements and increases bearing capacity and stability.
Project timetable	2009
Volumes and dimensions	Area = 8 x 15 m x 10 m, stabilised volume = $A \times 3 \text{ m (depth)} = 3600 \text{ m}^3$.
Geology and stabilized material	The test field is located on soft peat. The level of the ground water is near the ground level. The top layer (2.5-3.0 m) is medium decomposed peat. Underlying thin soil layer is clayey silt or fine sand. Under that is clayey sand with gravel. Properties of the peat: shear strength ≈ 5 kPa, w = 760-930 % and pH 4.5-5.8.
Target strength of the stabilized material	Shear strength 50 kPa
Binders (kg/m³)	Cement (150, 200, 250), Cement+Sand: (250+97), Cement+ Fly ash: (70+100, 76+150, 100+100, 100+200, 150+200)
Laboratory and field tests	Laboratory tests, permeability tests, settlement plates, quality control soundings (column penetrometer and vane tests).
Other	-
Long-term follow-up and lessons learned	To study the long-term functionality, additional quality control soundings were performed 6.5 years after the stabilization. Especially in the areas where the binder contained fly ash, the in-situ strength had increased. Settlements were observed for the same period of time. No settlements were observed after year 2009. As a conclusion it is sure that mass stabilisation will be reasonably good soil improvement method for a highway on soft soil areas in the perspective of environmental safety, geotechnical advantages and cost savings. Only cement as a binder gave high strength in a short-term but combined with fly ash strength gain was slower but last longer.
Sources	<p>Forsman, J. Hakari, M., Jyrävä, H., Ritsberg, K. & Skepast, P. 2009. <i>Mass stabilization of R263 highway section Kose – Mäo in Estonia</i>. XXVII International Baltic Road Conference Riga, Latvia. 10 p.</p> <p>Hietala, P. 2009. <i>Laboratory stabilisation test. Kose-Mäo, Mass stabilisation field test</i>. Ramboll, Report 16.6.2009.</p> <p>Piispanen, P., Kaski, A. & Forsman, J. 2015. <i>Kose-Mäo test mass stabilisation compression test (column penetration soundings) 2015</i>. Quality control report. Estonian Road Administration. 12 p.</p>
Stabilization contractor	Niska & Nyssönen



KOSE-MÄO

Mass stabilisation layout. Different areas for different binders.



Mass stabilisation in process 28.1.2009.



Soundings 11/2015, 6.5 years after the mass stabilisation.

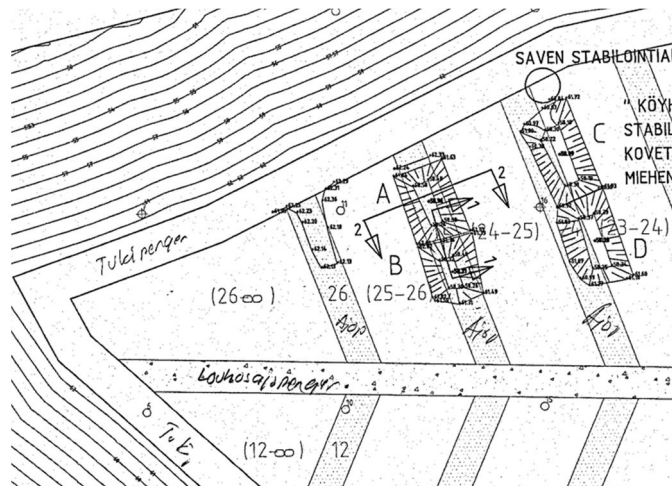


Liite 4. Kulomäen täyttömaän koerakenne

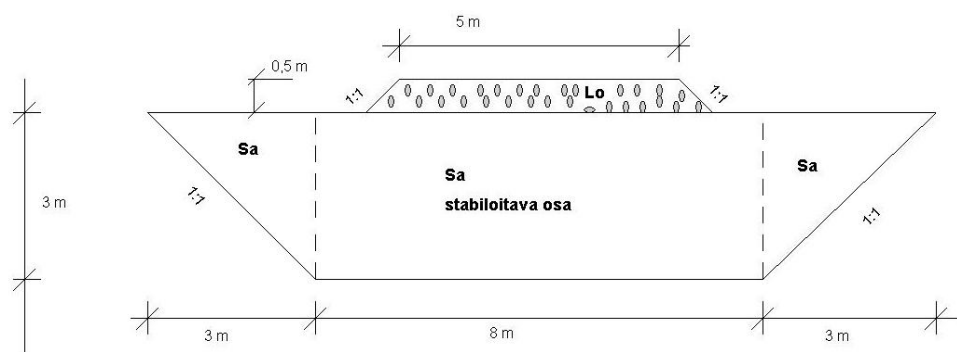
Koerakenteen tarkoituksena oli tutkia pienillä sementtimäärillä stabiloidun saven soveltuvuutta täyttömaän tukipenkereiden rakennusmateriaalina. Massastabilointi tehtiin neljässä louheesta rakennetussa altaassa. Käytetty sementtimäärä oli altaasta riippuen 30, 40, 50 tai 60 kg/m³. Stabiloinnin tavoiteleikkauslujuus oli 50 kPa. Altaiden syvyys oli noin 3 m ja tilavuus noin 650 m³. Altaat rakennettiin marraskuussa 2008, altaiden täyttäminen tehtiin 3.3.-26.4.2009 ja 18.5.-5.6.2009. Stabilointityö suoritettiin 27.-30.7.2009. Stabilointiurakoitsijana oli Biomaa Oy.



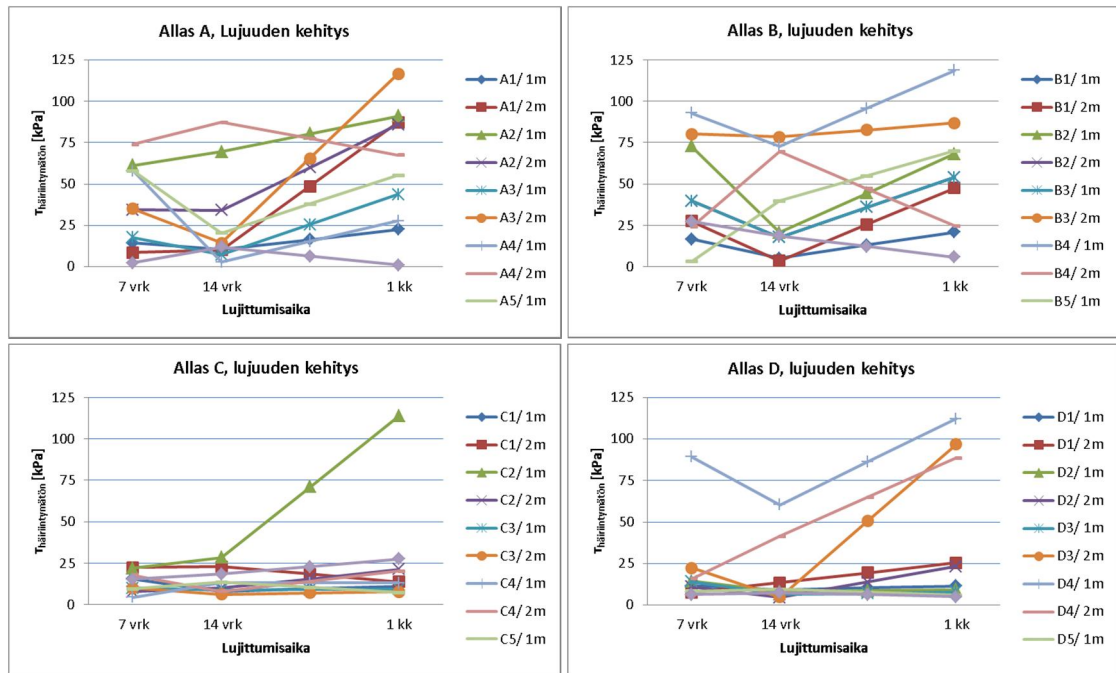
Kulomäen täyttömaän sijainti



Stabilointialtaiden sijainti täyttömaässä



Stabilointialtaan periaatepoikkileikkaus.



Stabiloinnin lujuus altaissa. Käytetyt sementtimäärät 50 kg/m^3 (Allas A), 60 kg/m^3 (Allas B), 30 kg/m^3 (Allas C) ja 40 kg/m^3 (Allas D).

Viivästyksistä johtuen koerakenne rakennettiin suunnitelmasta poikkeavaan paikkaan. Luokitus- ja stabiloitavuuskokeet oli tehty alkuperäisistä stabilointialtaista otetuille näytteille, kun taas varsinainen koestabilointi tehtiin eri materiaalista. Saven laadullinen epätasaisuus ja kuivuus haittasivat stabiloinnin onnistumista. Saven altaisiin ajon ja stabilointityön aikana sää oli lämmin, kuiva ja aurinkoinen. Altaissa ollut savi pääsi kuivumaan pahoin ennen stabilointia, eikä altaisiin lisättyä vettä saatu sekoitettua kunnolla altaan pohjaan myöten. Osa altaisiin lisätystä vedestä pääsi todennäköisesti haihtumaan tai valumaan pois altaasta kuivuneen, kokkareisen saven ja louhepenkereen läpi. Altaiden kuivuminen aiheutti ongelmia sideaineen sekoittamisessa. Valmiissa stabiloinnissa on todennäköisesti sekaisin kuivuneita savikokkareita ja stabiloitunutta savea.

Lähteet:

Kuismin, A. 2017. Pienillä sementtimäärillä stabiloidun saven käyttö täyttömäen tukipenkereissä: Kulomäen koerakenne. Erikoistyö. Aalto-yliopisto, Insinööritieteiden korkeakoulu

Vantaan Kaupunki. 2009. Kulomäen täyttömäki, Saven massastabilointi sementillä. Koerakentamisen loppuraportti;

Liite 5. Jätkäsaaren kohdekortti

CASE JÄTKÄSAARI

JÄTKÄSAARI Helsinki, Finland Ex-situ utilization of contaminated sediments by mass stabilization		Key words: ex-situ mass stabilization, contaminated sediments
General information	<p>The project concerned stabilization of dredged clay and slime sediments in three phases in 2010s in temporary stabilization basins. The 3,5m high embankments of the basins were made of coarse non-cohesive soil and the bottom of the basins was covered by asphalt. The thickness of the stabilized sediment layer was approximately 2,5...3 m. The stabilized mass was mildly contaminated and the concentrations of harmful substances exceeded the lower values set for metals and the threshold values for organic substances.</p>	
Advantages of stabilization	<p>Processing of mildly contaminated and clean sediment masses in order to turn them into a good-quality filling material. The dredged and stabilized sediments were utilized in landscaping etc.</p>	
Project timetable	<p>Phase I in 2010-2011 Phase II in 2012-2013 Phase III in 2014-2016</p>	
Volumes and dimensions	<p>Phase I: 20 000 m³ + Phase II: 81 000 m³ + Phase III: 23 500 m³</p>	
Geology and stabilized material	<p>Clay, w = 70...100 %, LoI = 3...4 %</p>	
Target strength of the stabilized material	<p>Shear strength 40-60 kPa</p>	
Binder(s)	<p>Various different combinations of binders (cement, chalk and many different industrial by-products, f.e. fly ash, FSG). Amount of binders varied from 50 kg/m³ to 200 kg/m³</p>	
Laboratory and field tests	<p>Sampling, index and stabilization tests in the laboratory, stabilization tests with various binder mixture combinations. Quality control investigations (soundings, test pits, laboratory samples) in the basins, quality control soundings in the temporary stockpiles (column penetrometer). In addition, leaching and other environmental tests were carried out for unstabilized sediment.</p>	
Other	<p>The permeability of the stabilized sediment was examined in the embankment of Sepänmäki where the sediments were utilized.</p>	
Long-term follow-up and lessons learned	<p>-</p>	
Sources	<p>Forsman, J <i>et al.</i> (2015), Three mass stabilization phases in the West Harbour of Helsinki, Finland – geotechnical and environmental properties of mass stabilized dredged sediments as construction material, Deep mixing conference, San Francisco ABSOILS, (2015), Final report on the pilot applications and quality control of the absoils project, available: http://projektit.ramboll.fi/life/absoils/matsku/absoils_final_report_on_pilots_and_quality_control.pdf</p>	
Stabilization contractor	<p>Biomaa Oy</p>	



CASE JÄTKÄSAARI

Aerial picture of the stabilization basins in Jätkäsaari



Stabilized sediments temporarily stored in stabilization basins in Jätkäsaari



Stabilized and piled sediment

